

Wissensbasierte Modellierung vernetzt-kooperativer Gebäudeplanung unter Verwendung von Methoden der Fuzzy-Logik

Dem Fachbereich Bauwissenschaften
der Universität Duisburg- Essen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
vorgelegte und genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Markus Hartmann
aus Breuberg im Odenwald

Essen 2008

Dr.-Ing. Markus Hartmann

Geboren 1972 in Erbach im Odenwald. Von 1993 bis 1999 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 1999 bis 2000 Bauleiter der ZN Ingenieur- und Tiefbau bei der Philipp Holzmann AG in Frankfurt am Main. Von 2000 bis 2005 Tragwerksplaner bei der BGS Ingenieursozietät – Beratende Ingenieure für Bau- und Verkehrswesen in Frankfurt am Main. Von 2002 bis 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Von 2004 bis 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen. Von 2006 bis 2007 Mitarbeiter im Ingenieurbüro Bernhardt & Mertens in Darmstadt. Seit 2007 geschäftsführender Gesellschafter der BERNHARDT Ingenieure GmbH in Darmstadt, sowie seit 2006 Lehrbeauftragter für das Fach „Betonfertigteilkonstruktionen“ im Fachbereich Bauingenieurwesen der Hochschule Bochum.

Referentin:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Beucke
Tag der Einreichung:	7. August 2007
Tag der mündlichen Prüfung:	11. Januar 2008

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt sowie der Universität Duisburg-Essen.

Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held danke ich herzlich für die Betreuung und Förderung meiner Arbeit sowie die in jeder Hinsicht gewährte Unterstützung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Beucke danke ich sehr für die Übernahme des Korreferats und für sein Interesse an meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen am Institut für Massivbau. Die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Torben Pullmann, der nicht nur aufgrund unserer gemeinsamen – teils vehement geführten – Diskussionen, während den langen Autofahrten zwischen Heimat und Arbeitsplatz, sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Durch zahlreiche Anmerkungen und sinnvolle Anregungen sowie der konstruktiven Kritik durch die Herren Prof. Dr.-Ing. Andrej Albert und Mark Freischlad wurde die vorliegende Arbeit zusätzlich sehr positiv beeinflusst. Zahlreiche Studenten haben im Rahmen von Studienarbeiten Beiträge zur vorliegenden Arbeit geleistet, wofür ich mich an dieser Stelle ebenfalls herzlich bedanke.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern für ihre stetige Unterstützung im Umfeld meiner Studien während der letzten Jahre. Sie haben mir meine Arbeit sehr erleichtert.

Schließlich gilt mein außerordentlichster Dank meiner Frau Simone und meinem Sohn Philipp für ihr ausdauerndes Verständnis und ihre Unterstützung im Rahmen der Anfertigung dieser Arbeit aber auch – und ganz besonders – für die liebevolle Ablenkung.

Gewidmet unserem am 26. Oktober 2005 geborenen Sohn Philipp, dem ich durch seine vielen Besuche auf Papas Schoß am Schreibtisch einen Großteil der schriftlichen Anfertigung dieser Arbeit in einhändiger Maschinenschreibweise zu verdanken habe!

Breuberg, im Januar 2008

Markus Hartmann

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	III
1 EINLEITUNG	1
1.1 MOTIVATION.....	1
1.2 AUSGANGSSITUATION.....	3
1.2.1 Referenzmodell	3
1.2.2 Beispielszenario	4
1.3 ZIELSETZUNG.....	6
2 GRUNDLAGEN.....	8
2.1 BEGRIFFSDEFINITIONEN	8
2.1.1 Definition der (vernetzten) Kooperation	9
2.1.2 Kooperationsformen.....	10
2.2 WISSENSBASIERTE SYSTEME / EXPERTENSYSTEME	11
2.3 FUZZY-LOGIK	13
2.3.1 Allgemeines.....	13
2.3.2 Theorie der Fuzzy-Mengen	14
2.3.3 Operationen mit Fuzzy-Mengen	16
2.3.4 Regelbasierte Fuzzy-Systeme	19
3 STAND DER FORSCHUNG	33
3.1 WISSENSBASIERTE ANSÄTZE	33
3.2 KOOPERATIONSUNTERSTÜTZENDE ANSÄTZE	36
4 MORLA-MODELL	40
4.1 SYSTEMARCHITEKTUR IN VERTEILTER UMGEBUNG	42
4.2 VERTEILTE MODELLBEARBEITUNG	44
4.3 PRODUKT-DATEN-MODELL	48
4.4 WISSENS-DATEN-MODELL	52
4.5 INFERENZPROZESS	62

5	FUZZY-MODELLE FÜR SENSITIVITÄTSANALYSEN INFOLGE PLANUNGSÄNDERUNGEN	73
5.1	CHARAKTERISTISCHE EIGENSCHAFTEN LOGISCHER FUZZY-MODELLE BEI DER ANWENDUNG IM RAHMEN DER SENSITIVITÄTSANALYSE	75
5.1.1	Bestimmung adäquater Fuzzy-Operatoren.....	75
5.1.2	Defuzzifikation von Fuzzy-Ergebnismengen.....	76
5.1.3	Definition der Spezifität von Fuzzy-Ergebnismengen.....	80
5.1.4	Kohärenz der Regelbasis logischer Fuzzy-Modelle.....	85
5.2	FUZZY-MODELL FÜR DIE SENSITIVITÄTSANALYSE INFOLGE PLANUNGSÄNDERUNGEN ZENTRISCH BELASTETER STAHLBETONWÄNDE..	86
5.2.1	Bemessung von Stahlbetonwänden.....	87
5.2.2	Definition der Fuzzy-Variablen	89
5.2.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Fuzzy-Modell mit vergleichender Parameterstudie	91
5.2.4	Anmerkung zur Extrapolation und Optimierung der Fuzzy-Modelle	96
6	IMPLEMENTIERUNG UND ANWENDUNG DES MORLA-MODELLS	98
6.1	ENTWICKLUNG VON SOFTWAREAPPLIKATIONEN	99
6.2	ANWENDUNG - KBDT	103
6.3	ANWENDUNG – DAVINCI.....	109
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	120
7.1	ZUSAMMENFASSUNG	120
7.2	AUSBLICK	122
ANHANG A	GRUNDLAGEN DES FUZZY-MODELLS FÜR DIE SENSITIVITÄTSANALYSE	125
ANHANG B	VERANKERTE METHODEN VON PDM-ZUGRIFFEN	130
ANHANG C	ELEMENTE DER MORLA-WISSENSBANKEN	133
	LITERATURVERZEICHNIS	142

KAPITEL 1

EINLEITUNG

1.1 Motivation

Die bei der Realisierung von Bauvorhaben übliche Beteiligung mehrerer, räumlich verteilt angeordneter Planer verlangt eine adäquate Kommunikationsinfrastruktur. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stehen für die Kommunikation und Kooperation (beispielsweise zwischen Projektsteuerer und Fachplanern) internetbasierte Projektmanagement-Systeme zur Verfügung [ZIM99a]; [STE98]. Der Informationsaustausch wird im Rahmen solcher auch als „Datenpool“ oder „Projektserver“ bezeichneten Systeme jedoch ausschließlich dokumentenbasiert durchgeführt [BEH02]. Diese Arbeitsweise ist zeit- und somit kostenintensiv, da jede neue Information eines Projektbeteiligten aus dessen Dokument in die Dokumente aller anderen Beteiligten übernommen werden muss. Wenn beispielsweise verschiedene Projektbeteiligte ihren Arbeiten unterschiedliche Planungszustände zugrunde legen, birgt die dokumentenbasierte Arbeitsweise zusätzlich die Gefahr von Inkonsistenzen. Um die beschriebenen Schwierigkeiten zu umgehen, ist ein gemeinsames vernetzt-kooperatives Arbeiten aller Planungsbeteiligten an einem digitalen Gebäudemodell wünschenswert.

Insbesondere aufgrund des hohen Kostendruckes und der damit verbundenen Reduzierung der zur Verfügung stehenden Planungszeiträume ist es im Rahmen vernetzt-kooperativer Planungsprozesse unabdingbar, die beteiligten Planer bei der Identifikation der Konsequenzen aus Planungsänderungen anderer Beteiligter durch geeignete Software zu unterstützen. Diese Notwendigkeit wird noch dadurch verstärkt, dass die Ziele der verschiedenen Planungsbeteiligten häufig im

Widerspruch zueinander stehen. Bei rechnergestützten Kooperationssystemen ist dies nur durch gezielte Kommunikations- und Koordinationslogik zu beheben [FRU04].

Bezüglich der Identifikation von Konsequenzen, die sich aus Änderungen anderer Planungsbeteiligter ergeben, bestehen für den planenden Ingenieur zwei Schwierigkeiten. Zum Einen kann eine Vielzahl von bereits geführten Nachweisen durch die Änderung eines einzelnen Parameters betroffen sein. In diesem Fall muss eine geeignete Software in der Lage sein, sämtliche Abhängigkeiten von Parametern untereinander zu erkennen und dadurch alle von der Änderung betroffenen Nachweise zu identifizieren. Zum Anderen können die Auswirkungen von Planungsänderungen auf einzelne Nachweise sehr komplex sein. Im Rahmen der heute noch üblichen Arbeitsweise müssen Fachplaner im Rahmen von Planungsbesprechungen derartige Konsequenzen dennoch – häufig aufgrund von Erfahrungswissen – abschätzen können. Die wesentliche Schwierigkeit, solche „erfahrungsgestützten Abschätzungen“ in geeigneter Weise computerbasiert zu unterstützen, besteht darin, dass die zugrunde liegenden Probleme bei analytischer Formulierung meist hochgradig nichtlinear sind. Das Entscheidungsmodell soll jedoch möglichst einfach und transparent sein. Derartige Modelle müssen in einem System für vernetzt-kooperative Planungsprozesse zur Verfügung stehen, um die im Rahmen der Kooperation erforderlichen Entscheidungsprozesse der einzelnen Planer adäquat zu unterstützen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist eine Unterstützung modellbasierter vernetzt-kooperativer Planungsprozesse im Bauwesen, welche die aufgeführten Anforderungen erfüllt, nicht verfügbar [SAN04], [MIL05]. Der sinnvolle Einsatz sowie die mögliche Kombination von Methoden aus den Bereichen der künstlichen Intelligenz (KI) und der verteilten künstlichen Intelligenz (VKI bzw. DAI - Englisch: Distributed Artificial Intelligence) bieten die Grundlage zur Lösung dieser Problemstellungen.

Eine wissensbasierte Modellierung der verschiedenen Nachweisprozesse bietet durch die programminterne Trennung von Fachwissen und anwendungsunabhängigen Problemlösungsstrategien einen geeigneten Ansatz für eine effiziente vernetzt-kooperative Projektplanung. Hierbei werden die einzelnen Wissensbanken der verschiedenen Fachplaner kontinuierlich auf ein zentrales Gebäudemodell angewendet. Ein zentraler Inferenzmechanismus stellt die

Konsistenz des gemeinsamen Modells dieser verteilten und heterogenen Planungsumgebung sicher. Die Abhängigkeiten verschiedener Berechnungsparameter können zum Zeitpunkt der Auswertung vom Inferenzmechanismus erfasst werden, wodurch eine lückenlose Identifikation von (teils gewerkeübergreifenden) Konsequenzen aus Planungsmodifikationen ermöglicht wird. Modelle, die auf den Methoden der Fuzzy-Logik basieren und geeignet für die Unterstützung komplexer Planungsentscheidungen sind, können in einen solchen wissensbasierten Ansatz integriert werden.

1.2 Ausgangssituation

Ähnlich dem „*TopDown*“ *Planungsgrundsatz* [SEL03] untergliedert sich die Objektplanung in die gemäß HOAI [KMV04] definierten Planungsphasen. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Nachweisführung im Rahmen der Genehmigungsplanung.

Die Grundlage bildet ein digitales Gebäudemodell, dessen Bauelemente auf Basis von Systemachsen und –ebenen definiert und manuell bzw. mit Hilfe adäquater Formalismen wie beispielsweise in [FSH02a] für Deckensysteme vorgestellt, vordimensioniert und zu Volumenkörpern extrudiert wurden. Grundsätzlich wird ein funktionstüchtiges gewerkespezifisches Modell (z. B. für die Tragwerksplanung → Tragwerksmodell) zugrunde gelegt.

1.2.1 Referenzmodell

Zur Überprüfung der im Rahmen dieser Arbeit erstellten Modelle und Konzepte wurde auf der Grundlage des erarbeiteten Produkt-Daten-Modells (PDM) ein Referenzgebäudemodell erstellt. Das dreigeschossige Bürogebäude sieht dabei Gebäudemodellinstanzen der in dieser Arbeit beispielhaft untersuchten Gewerke der Tragwerksplanung sowie der Haustechnik vor.

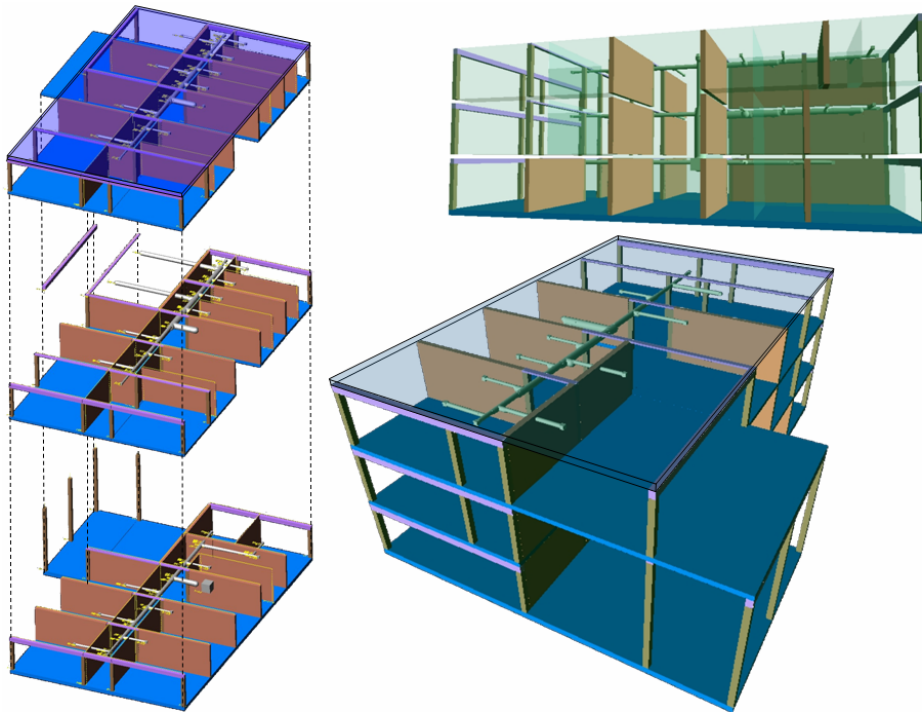


Abbildung 1.1: Darstellungen des Referenzmodells

1.2.2 Beispielszenario

Mit Hilfe des folgenden Szenarios am Beispiel des vorgestellten Referenzmodells soll exemplarisch der vernetzt-kooperative Planungsprozess auf der Grundlage des zu erarbeitenden wissensbasierten Ansatzes in einer verteilten Planungsumgebung erläutert werden:

Aufgrund eines Mieterwunsches soll planungsbegleitend eine Nutzungsänderung erfolgen. Im 2. Obergeschoss soll eine EDV-Anlage an Stelle einer Büroeinheit errichtet werden. Die geplante Änderung wird als eigenständiges Änderungsszenario auf dem zentralen Projektserver vom Architekten eingepflegt. Infolge der Modifikation ändert sich innerhalb der zentralen Datenbank der Wert des Berechnungselementes „Nutzungsart“. Zunächst erfolgt vom System eine Überprüfung der Instanzen, welche den Wert des geänderten Berechnungselementes zur Ermittlung ihres eigenen Wertes bei der Nachweisführung verwendet haben. Die räumlich verteilt angeordneten Projektbeteiligten (hier: Tragwerksplaner und Haustechniker), welche die betroffenen Elemente für Ihre Nachweise verwenden,

werden unverzüglich und automatisch über die Veränderung informiert. Dies führt zu einer unüberschaubar großen Anzahl betroffener Elemente über alle Geschosse.

Eine, dem erneuten Nachweisprozess vorangeschaltete Sensitivitätsanalyse überprüft daher zunächst das Risiko der Veränderung planungsrelevanter Parameter. Diese Evaluierung kommt zu dem Ergebnis, dass infolge der Steigerung der Verkehrslast aufgrund der Nutzungsänderung u.a. eine lastabtragende Wand im 1. Obergeschoss verbreitert werden muss. Gleichzeitig wird mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse aufgrund der erhöhten Wärmelast durch die EDV-Anlage eine Vergrößerung des RLT-Kanalquerschnittes aus dem Rechnerzentrum heraus von 20 Prozent approximiert. Weitere Querschnitte des Hauptstranges bleiben unverändert. Infolge der Querschnittsvergrößerung wird zusätzlich eine Verbreiterung einer naheliegenden lastabtragenden Wand aufgrund des resultierenden größeren Wanddurchbruchs von 2 Prozent approximiert. Aufgrund der überschaubaren Anzahl planungsrelevanter Konsequenzen entscheiden sich die Planer für die Umsetzung des Änderungswunsches und somit für das Führen der erforderlichen Nachweise.

Die neue, genaue Überprüfung des erforderlichen Luftwechsels ergibt eine geringere Vergrößerung des betrachteten Lüftungsquerschnitts von nur noch 15 Prozent. Dies erfordert eine nur noch geringe Vergrößerung des Durchbruchs in der betroffenen Wand. Diese Konsequenz wird als Folgeanfrage des Haustechnikers an den Projektserver gestellt. Der innerhalb der Wissensbank „Tragwerksplanung“ aufgrund der Änderung als „erforderlich aber nicht geführt“ angezeigte Nachweis der Einhaltung der Auflagerpressung ergibt nach einer erneuten Auswertung eine Überschreitung des maximal zulässigen Bewehrungsgrades von 8 Prozent. Der Inferenzmechanismus führt in diesem Fall sämtliche veränderbaren Werte, welche für den Nachweis verwendet wurden, auf und gibt dem Tragwerksplaner auf diese Art Hinweise, wie die Erbringung des Nachweises ermöglicht werden kann. Der Tragwerksplaner entscheidet sich für die Verbreiterung der Wand um 2 cm. Nach einer erneuten Auswertung der Nachweise können wiederum die Folgeanfrage sowie die ursprüngliche Anfrage bestätigt werden.

Nach Bestätigung der verschiedenen Anfragen und Folgeanfragen durch alle Projektbeteiligten werden die Änderungen nunmehr persistent in die zentrale Projektdatenbank übernommen und können von dort von allen Projektbeteiligten jederzeit abgerufen werden.

1.3 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von Konzepten für vernetzt-koooperative Planungsprozesse im Rahmen der Nachweisführung auf der Grundlage wissensbasierter Modellierungsansätze. Zur Sicherstellung einer hohen Modularität des Gesamtsystems und somit einer starken Unabhängigkeit der Wissensbanken sowohl voneinander als auch von einem zentralen Inferenzmechanismus erfolgt eine deklarative Form der Wissensrepräsentation für die verschiedenen am Planungsprozess beteiligten heterogenen Wissensdomänen. Die (gewerkeübergreifenden) Abhängigkeiten der verschiedenen Planungsparameter werden von Inferenzmechanismen verfolgt, wodurch die lückenlose Identifikation der Konsequenzen von Planungsänderungen ermöglicht und ein konsistentes Modell sichergestellt wird.

Zusätzlich soll der Anwender bei der Approximation von Konsequenzen infolge Planungsmodifikationen vom System adäquat unterstützt werden. Auf der Grundlage von Methoden der Fuzzy-Logik soll ein Formalismus Anwendung finden, der unter Verwendung weniger Einflussgrößen die Wirkungszusammenhänge für den Benutzer des Systems transparent gestaltet und dennoch komplexe Abbildungen erzeugen kann.

In früheren Arbeiten zur wissensbasierten Nachweisführung ([ALB02], [HOL96], [GAH92]) hat sich ein aus Teilmodellen bestehendes *objektorientiertes Wissensrepräsentationsmodell* bewährt. Eine Unterteilung in Teilmodelle wird auch dem im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Modell, welches im Folgenden als **Multi-Objective Representation of Knowledge and its Applications – Modell (MORLA-Modell)** bezeichnet wird, zugrunde gelegt. Hierfür muss ein *Produkt-Daten-Modell* erarbeitet werden, welches die Belange von Bauteilen unterschiedlicher Gewerke sowie insbesondere deren Kreuzungspunkte (z. B. Wanddurchbruch) berücksichtigt. Beispielhaft sollen in dieser Arbeit die für die Gewerke der *Tragwerksplanung* (Bereich *Stahlbetonbau*) und *Haustechnik* (Bereich *Raumlufttechnik*) erforderlichen Klassen erfasst werden. Gleichzeitig müssen die Anforderungen der verteilten Planungsumgebung (Änderungsmodelle, Sperrmechanismen, Planungshistorie, etc.) berücksichtigt werden. Auf dem zu entwickelnden *Produkt-Daten-Modell* sollen mit Hilfe von Elementen

gewerkespezifischer Wissensbanken Berechnungen ausgeführt werden, die den jeweiligen Fachplaner bei der Nachweisführung seiner gewerkezugehörigen Bauteile unterstützen. Die Elemente, mit deren Hilfe das hierfür erforderliche Wissen formalisiert wird, stellen Instanzen eines weiteren Teilmodells, dem *Wissens-Daten-Modell* (*KDM – Knowledge-Data-Model*) dar. Dieses Modell basiert auf dem *Modell der Elemente der Wissensbank* (*MEW*) von Albert [ALB02], sowie auf der *Data Item Hierarchy* von Garret und Hakim [GAH92]. Es erweitert diese Modelle jedoch um Methoden zur Integration *logischer Fuzzy-Modelle* sowie um Konzepte zur Erfüllung der Anforderungen, die sich im Rahmen einer verteilten Planungsumgebung ergeben. Für die Anwendung der zu entwickelnden Modelle sollen adäquate Softwareprototypen entwickelt werden.

KAPITEL 2

GRUNDLAGEN

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit beruhen auf Modellen informationsverarbeitender Systeme, die in einer vernetzt-kooperativen Planungsumgebung eingesetzt werden. Es wird daher zunächst eine Erläuterung kooperativer Projektarbeit als Grundlage für die später vorgestellten Konzepte im Rahmen der verteilten Modellbearbeitung diesem Kapitel vorangestellt, bevor anschließend die Grundlagen wissensbasierter Systeme kurz aufgezeigt werden. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse planungsrelevanter Parameter infolge Planungsmodifikationen werden Methoden der Fuzzy-Logik eingesetzt, deren Vorstellung der Grundlagen dieses Kapitel abschließen.

2.1 Begriffsdefinitionen

Kooperative Planungsprozesse können allgemein als die Zusammenarbeit mehrerer (lokal verteilt angeordneter) Personen, Gruppen oder Institutionen an einem gemeinsamen Material auf ein gemeinsames Ziel hin beschrieben werden [BOS95]. Das für eine Kooperation erforderliche definierte gemeinsame Material stellt für die Domäne Bauwesen im Bereich rechnergestützter Planung das von allen Projektbeteiligten zu bearbeitende Gebäudemodell (als Produkt-Daten-Modell-Instanz) dar [SCH95]. Grundlegende Voraussetzung für kooperatives Arbeiten bildet die Existenz mehrerer an einem Projekt arbeitender (verteilt angeordneter) Beteiligten, deren Arbeit auf die Erfüllung des gemeinsamen Ziels der Kooperation ausgerichtet ist [OBE91]. Dieses oberste Ziel ist im Allgemeinen die Durchführung

und Fertigstellung eines Projektes, welches als ein Kompendium vieler einzelner Teilprojekte angesehen werden kann. Da jeder Projektbeteiligte bestrebt ist, sein Planungsziel zu erreichen, existieren neben dem gemeinsamen übergeordneten Ziel mehrere Unterziele. Diese „individuellen“ Ziele können jedoch auch im Widerspruch zueinander stehen. Die Behebung dieser Widersprüche ist bei rechnergestützten Kooperationssystemen nur durch gezielte Kommunikations- und Koordinationslogik zu realisieren.

2.1.1 Definition der (vernetzten) Kooperation

Zielorientierte Planungstätigkeiten von Planungsbeteiligten eines Projektes basieren auf den Gruppenprozessen *Kommunikation*, *Koordination* und *Kooperation* [TS+95]. Diese Grundmechanismen unterliegen einer hierarchischen Anordnung, welche die Kommunikation und Koordination dem Erreichen von Kooperation voranstellt. So basieren Kooperationsprozesse, wie beispielsweise das gemeinsame Erstellen einer Ausführungsplanung, auf Koordinationsprozessen (beispielsweise dem gegenseitigen Abstimmen einzelner Planungstätigkeiten), die wiederum Kommunikationsprozesse (z.B. Projektbesprechungen) erforderlich machen. Im Folgenden werden die Grundmechanismen in Abhängigkeit der hierarchischen Gliederung kurz definiert [BRE98]:

Kommunikation:

Kommunikation stellt den reinen Austausch von Informationen zwischen mehreren Projektbeteiligten bzw. zwischen mehreren *CAE-Applikationen* (*Computer Aided Engineering*) dar. Grundsätzlich ist zur Kommunikation weder die Existenz eines gemeinsamen Planungsziels, noch die Verwendung eines gemeinsamen Projektmaterials erforderlich.

Koordination:

Koordination basiert auf Kommunikation und dient dazu, neben Informationen auch weitere Ressourcen, insbesondere ein gemeinsames Projektmaterial (Gebäudemodell) bereitzustellen. Koordination setzt wie Kommunikation a priori kein gemeinsames Ziel voraus. Aufgabe der Koordination ist die Abstimmung

konkurrierender Planungstätigkeiten unter Verwendung gemeinsamer Materialien, zwecks Sicherstellung eines abgestimmten Zusammenwirkens.

Kooperation:

Kooperation bedingt Koordinationsprozesse und stellt eine spezielle Form der Kommunikation dar. Kooperation setzt sowohl die Verwendung eines gemeinsamen Materials, als auch die Existenz eines gemeinsamen Planungsziels voraus. Entscheidungen werden unter den Projektbeteiligten in Abstimmung getroffen und führen so zum Aufbau eines gegenseitigen Verständnisses. Kooperation kann durch Arbeit an gemeinsamem Material (*implizite Kooperation*) oder durch ein bewusstes Austauschen von Informationen im Sinne einer Konversation (*explizite Kooperation*) erfolgen.

2.1.2 Kooperationsformen

Kooperation kann neben der Betrachtung der zuvor aufgeführten Bestandteile zusätzlich in differenziertere Kategorien eingeteilt werden. Eine weitverbreitete Form der Kategorisierung rechnergestützter Kooperation ist die Raum-Zeit-Klassifikation im Forschungsgebiet *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)* [JOH88]. Zu unterscheiden ist hierbei zwischen den Dimensionen *Ort* und *Zeit*, welche jeweils unabhängig voneinander ausgeprägt sein können. So ist bezüglich der Dimension *Ort* zwischen *zentraler* und *verteilter* Kooperation zu unterscheiden. Von *synchroner* Kooperation spricht man, wenn diese zur selben *Zeit* stattfindet, wobei das Gegenteil die *asynchrone* Kooperation darstellt. Die Einteilung hinsichtlich der *Zeit* kann aber auch durch die Ausprägungen *wechselseitigen Arbeitens*, *parallelen Arbeitens*, sowie *sequentiellen Arbeitens* erfolgen [SG+93], wobei letzteres einer *asynchronen* Kooperation entspricht. Diese drei Kategorien unterscheiden sich neben der Zeit auch hinsichtlich des verwendeten Arbeitsmaterials.

Wechselseitiges Arbeiten:

Projektbeteiligte arbeiten *gleichzeitig* zusammen an einer gemeinsamen Aufgabe. Hierfür ist sowohl eine besondere Abstimmung der Beteiligten untereinander, als auch die sorgfältige Berücksichtigung von Beiträgen anderer Beteiligter notwendig.

Diese Form tritt zumeist dann auf, wenn Planungskonflikte entstanden sind, welche mittels Verhandlungen gelöst werden müssen.

Paralleles Arbeiten:

Voraussetzung für *paralleles* Arbeiten ist die Möglichkeit, die Gesamtaufgabe in geeignete Teilaufgaben untergliedern zu können. Diese Teilaufgaben sind verschiedene Teile des gemeinsamen Materials und können somit gleichzeitig von mehreren Beteiligten eines Projektes bearbeitet werden. Ergebnisse der Arbeit werden untereinander ausgetauscht, wodurch ein gemeinsames Kooperationsbewusstsein geschaffen wird.

Sequentielles Arbeiten:

Auch bei *sequentieller* Arbeitsform wird die Gesamtaufgabe in Teilaufgaben untergliedert. Diese Teilaufgaben können sich sowohl auf verschiedene, als auch auf gleiche Teile des gemeinsamen Materials beziehen. Die Bearbeitung der einzelnen Aufgaben erfolgt *nacheinander* und erzeugt so einen sequentiellen Arbeitsfluss, wobei in der Regel die Ergebnisse vorhergehender Arbeitstätigkeiten zur Lösung der eigenen Teilaufgabe dienen.

Alle vorgestellten Arbeitsformen werden bei der verteilten Modellbearbeitung im Rahmen des *MORLA-Modells* angewendet.

2.2 Wissensbasierte Systeme / Expertensysteme

„Ein Expertensystem ist ein Computersystem, das in einem gegebenen Spezialisierungsbereich menschliche Experten in Bezug auf ihr Wissen und ihre Schlussfolgerungsfähigkeit nachbildet“ [BK103]

Wissensbasierte Systeme stellen ein Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz (KI) dar. Dabei handelt es sich um Computerprogramme, welche Wissensrepräsentations-, sowie Wissensverarbeitungsmechanismen nutzen, um auf einem speziellen Wissensgebiet menschliche Problemlösungskompetenz nachzubilden. Durch den Einsatz eines so genannten Expertensystems als eine besondere Form wissensbasierter Systeme ist es möglich, ein begrenztes Aufgabengebiet ähnlich

dem Vorgehen eines Experten mit einem Computer zu lösen. Diffuse Anwendungsbereiche, die sich mit mathematisch-algorithmischen Formulierungsmethoden ungenügend beschreiben lassen, werden mit den symbolischen Techniken der Wissensverarbeitung gelöst [FRS90].

Grundlage eines jeden wissensbasierten Systems ist die Trennung zwischen der Darstellung des Wissens über den betreffenden Problembereich (Wissensbank) und der Verarbeitung dieses Wissens (Inferenzmechanismus) [BRL04]. Während in der Wissensbank spezifisches Wissen über den Anwendungsbereich formalisiert wird, stellt der Inferenzmechanismus eine anwendungsunabhängige Problemlösungskomponente dar. Die einzelnen Komponenten wissensbasierter Systeme gliedern sich wie folgt:

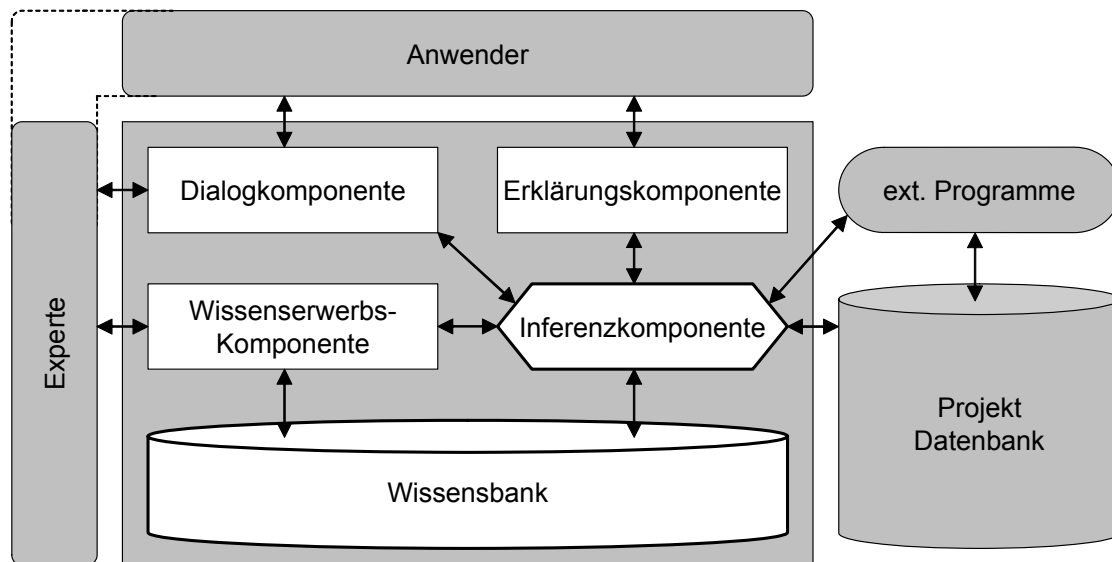


Abbildung 2.1: Komponenten wissensbasierter Systeme [SCH91],[BKI03]

Funktionsweisen sowie Interaktionsmechanismen der einzelnen Komponenten werden im Rahmen der für das *MORLA-Modell* erarbeiteten Konzepte in Kapitel 4 eingehend erläutert.

Infolge des in Abbildung 2.1 dargestellten Aufbaus sind wissensbasierte Systeme sowohl für den Anwender, als auch für den Entwickler (Experte) sehr transparent. Zum Einen wird dem Entwickler die Erstellung bzw. Modifikation der erforderlichen Wissensbank erleichtert, zum Anderen vereinfacht die transparente Wissensrepräsentation dem Anwender das Nachvollziehen der vom System evaluierten Resultate.

Die Unterscheidung der Herkunft der Art des in der Wissensbank vorhandenen Wissens wird in [PUP90] als einfaches Kriterium gewertet, um zwischen einem Expertensystem und allgemeiner einem wissensbasierten System zu unterscheiden. Expertensysteme sind demnach gerade spezielle wissensbasierte Systeme, bei denen das Wissen letztlich von Experten stammt.

2.3 Fuzzy-Logik

2.3.1 Allgemeines

„*Unschärfe Logik* stellt keine Bewertung einer Logik als unscharf dar, sondern besagt, dass es sich um ein mathematisch exakt definiertes Verfahren handelt, das mit unscharfen Begriffen zu operieren in der Lage ist.“ [WEB05].

Grundlage für die als Verallgemeinerung der zweiwertigen Bool'schen Logik von Zadeh in [ZAD65] vorgestellte Fuzzy-Logik ist das menschliche Verhalten im Rahmen von Entscheidungsfindungen. Die menschliche Informationsverarbeitung und die Informationsspeicherung erfolgen nicht binär. Sie basieren auf Zwischenstufen, da eine scharfe Abgrenzung zumeist nicht existiert.

Die „Unterlegenheit“ von Rechenmaschinen gegenüber der menschlichen Intelligenz führt Zadeh auf die maschinelle Unfähigkeit der Verarbeitung unpräziser Terme zurück. Für die Übertragung solch „intelligenter“ Fähigkeiten auf Maschinen entwickelte er Verfahren zur mathematischen Modellierung von Unschärfen auf der Grundlage des Konzepts der teilweisen Zugehörigkeit.

Durch die Zusammenfassung ähnlicher Phänomene unter einer größeren Kategorie mit unscharfen Randbereichen schlägt Zadeh eine Vereinfachung vor, mit dessen Hilfe ein adäquater Ansatz für die Bewältigung hochkomplexer Problemstellungen gegeben wird. Infolge einer solchen Zusammenfassung wird die für die Erfassung der Wirkungs- und Funktionsweise hochgradig komplexer Prozesse erforderliche Reduktion der Komplexität ermöglicht. Ziel ist hierbei die Erarbeitung von Formalismen zur Beschreibung und maschinellen Verarbeitung von Modellen auf einem annähernd natürlich- bzw. fachsprachlichen und verständlichen Niveau [ZAD95], [ZAD96].

Durch die Möglichkeit der Modellierung und Verarbeitung des menschlichen Gedankenguts wurde der Einsatz der *Fuzzy-Logik* u. a. auch im Rahmen von Expertensystemen vorangetrieben [ZAD83]. Die Verwendung von Methoden der *Fuzzy-Logik* bietet einen sehr guten Ansatz zur Formalisierung von Wissen. Des Weiteren wird durch die Möglichkeit einer natürlichsprachlichen Beschreibung die Lesbarkeit der Ergebnisse und damit die Transparenz für den Anwender erhöht. Die Entscheidungsfindung [ZIM98] mit Hilfe von *Fuzzy-Logik* wird in vielen technischen sowie in betriebswirtschaftlichen und organisatorischen Bereichen angewendet. Systeme, deren Verhalten durch die Auswertung von sprachlich formulierten Regeln bestimmt wird, stellen hierbei den größten Teil der in der Praxis angewandten Fuzzy-Systeme dar.

2.3.2 Theorie der Fuzzy-Mengen

Mit dem Begriff der *Fuzzy-Logik* wird zumeist die Theorie unscharfer Mengen assoziiert. Ihre Grundlage ist der Begriff der *unscharfen Menge*, der von Zadeh in [ZAD65] erstmals initiiert wurde.

In der klassischen zweiwertigen Logik gilt das Gesetz der ausgeschlossenen Mitte (Boole'sche Algebra). Durch diese binäre Definition ist eine Aussage entweder „wahr“ oder „falsch“.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } x \in A \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.1)$$

Zadeh bewirkte mit seiner in [ZAD65] vorgestellten *Theorie der unscharfen Mengen* eine Verallgemeinerung der klassischen Mengenlehre. Durch eine Eliminierung klarer Abgrenzungen bzgl. eines Zahlenwertes entstehen unscharfe Randbereiche und somit die gewünschte Unschärfe (Englisch: Fuzziness). Infolgedessen können Elemente dann auch zu einem gewissen Grad einer Menge angehören. Die Zugehörigkeitsfunktion kann folglich jeden Wert im Intervall $[0,1]$ annehmen (siehe Abbildung 2.2). Der dadurch geschaffene kontinuierliche Übergang zwischen Nichtzugehörigkeit eines Elementes x zur unscharfen Menge \tilde{A} ($\mu_{\tilde{A}}(x) = 0$) und voller Zugehörigkeit ($\mu_{\tilde{A}}(x) = 1$) kann das menschliche Verständnis für komplexe Sachverhalte besser wiedergeben. Eine unscharfe Menge über der Grundmenge X

mit den Elementen x dieser Grundmenge, die bezüglich einer unscharfen Aussage zu bewerten und einer Teilmenge von X zuzuordnen sind, definiert sich zu

$$\tilde{A} = \{ (x; \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid \forall x \in X \} \quad (2.2)$$

wobei die Funktion $\mu_{\tilde{A}}(x): X \rightarrow [0,1]$ den Grad angibt, zu dem ein Element $x \in X$ in der Menge \tilde{A} enthalten ist.

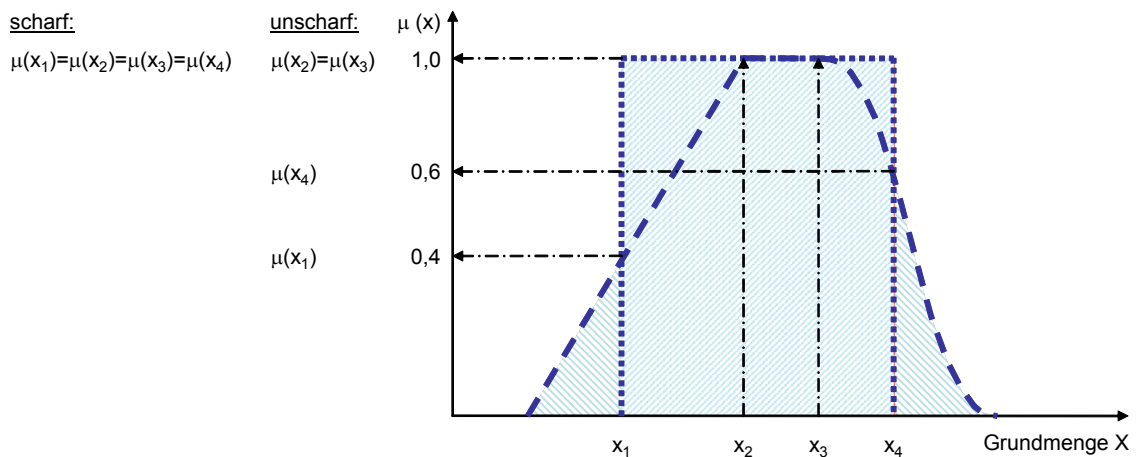


Abbildung 2.2: Gegenüberstellung scharfer und unscharfer Mengendefinitionen

Abbildung 2.3 zeigt beispielhaft die Definition der Fuzzy-Mengen „gering“, „mittel“ und „hoch“ für die Grundmenge bzw. Kenngröße einer möglichen Laststeigerung Δn [%] in einer Wand. Diese (Mengen-) Bezeichnungen sind Ausdrücke aus dem Sprachgebrauch und werden daher auch als *Linguistische Werte* (LW) titulierte. Fuzzy-Mengen bezeichnet man üblicherweise mit solchen Ausdrücken [ZAD75]. Variablen, die durch Linguistische Werte dargestellte Fuzzy-Mengen enthalten, werden entsprechend *Fuzzy-Variable* oder auch *Linguistische Variable* genannt (hier: Laststeigerung Δn [%]). Wie der Abbildung zu entnehmen ist, überschneiden sich die Fuzzy-Mengen bzw. ihre Zugehörigkeitsfunktionen typischerweise, so dass ein Element in der Regel mehreren Mengen gleichzeitig angehören kann. Die in Abbildung 2.3 dargestellte Laststeigerung von 24 % gehört somit zu einem Grad von $\mu_{\text{hoch}}(\Delta n) = 0,4$ zur Menge „hoch“, und hat damit eine geringfügig kleinere Zugehörigkeit als zur Menge „mittel“, der sie zu einem Grad von $\mu_{\text{mittel}}(\Delta n) = 0,6$ angehört. Beim häufigen Anwendungsfall der normierten

Darstellung der Fuzzy-Mengen ergänzen sich stets die entsprechenden Wahrheitsgehalte und ergeben in der Summe „1“.

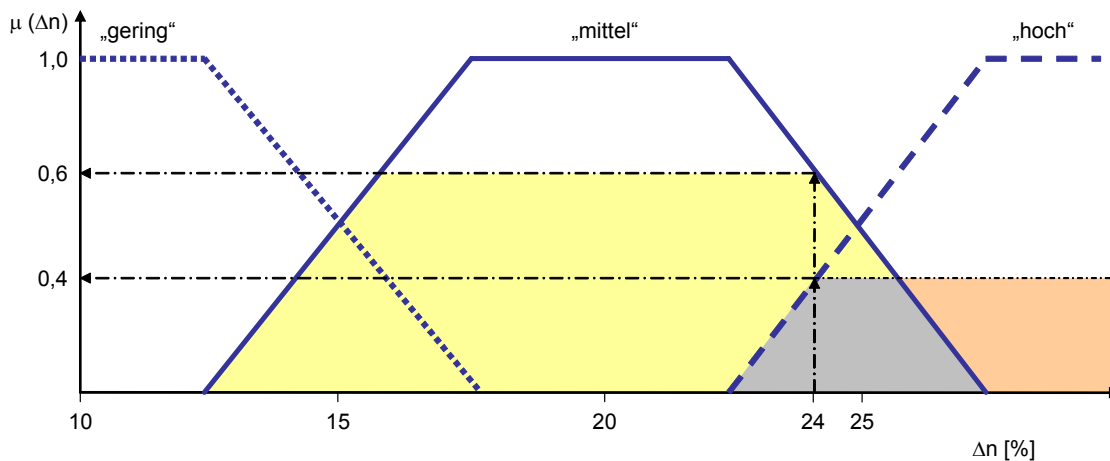


Abbildung 2.3: Beispielhafte Definition von Fuzzy-Mengen auf der Grundmenge einer möglichen Laststeigerung Δn [%]

Bei den meisten Anwendungsfällen reicht für die Definition der Fuzzy-Mengen ein linearer Verlauf der Zugehörigkeitsfunktion aus. Für den Fall einer an den realen Kontext noch exakter angepassten Mengendefinition werden in der Fuzzy-Logik weitere Formen für die Zugehörigkeitsfunktion (S-, π - und Z-Kurve) verwendet.

Mit Hilfe zusätzlicher sprachlicher Ausdrücke – so genannter *Linguistischer Hecken* – besteht eine weitere Möglichkeit zur Veränderung des Verlaufs der Zugehörigkeitsfunktion auf der Grundlage von Modifikationsoperatoren.

2.3.3 Operationen mit Fuzzy-Mengen

Zumeist müssen verschiedene Aussagen miteinander verknüpft und der daraus resultierende Wahrheitsgehalt bestimmt werden. In Analogie zu den Booleschen Verknüpfungsoperatoren UND, ODER und NICHT wurden in der Fuzzy-Logik eine Vielzahl von Operatoren zur Verknüpfung unscharfer Aussagen entwickelt, um das menschliche Entscheidungsverhalten möglichst adäquat nachzubilden. Mit Hilfe der charakteristischen Funktion (Zugehörigkeitsfunktion) lassen sich die elementaren Verknüpfungen von Mengen, wie die *Vereinigung* \cup und der *Durchschnitt* \cap zweier Mengen sowie die *Komplementbildung* einer gegebenen Menge bezüglich

einer umfassenden Menge darstellen. Für die Teilmengen \tilde{A}_1 und \tilde{A}_2 des Grundraums X wurden die Indikatorfunktionen von Zadeh definiert:

Komplement:

$$\tilde{\tilde{A}}_1 := \{ (x, \mu_{\tilde{\tilde{A}}_1}(x)) \mid \forall x \in X, \mu_{\tilde{\tilde{A}}_1}(x) := 1 - \mu_{\tilde{A}_1}(x) \} \quad (2.3)$$

Durchschnitt (Konjunktion):

$$\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2 := \{ (x, \mu_{\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2}(x)) \mid \forall x \in X, \mu_{\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2}(x) := \min(\mu_{\tilde{A}_1}(x), \mu_{\tilde{A}_2}(x)) \} \quad (2.4)$$

Vereinigung (Disjunktion):

$$\tilde{A}_1 \cup \tilde{A}_2 := \{ (x, \mu_{\tilde{A}_1 \cup \tilde{A}_2}(x)) \mid \forall x \in X, \mu_{\tilde{A}_1 \cup \tilde{A}_2}(x) := \max(\mu_{\tilde{A}_1}(x), \mu_{\tilde{A}_2}(x)) \} \quad (2.5)$$

Für diese Zugehörigkeitsfunktionen können bei Fuzzy-Mengen die für klassische Mengen geltenden Gesetzmäßigkeiten der Involution, Kommutativität, Assoziativität, Distributivität, Idempotenz und Absorbtion aufrechterhalten werden.

Konjunktions-Operatoren, welche die aufgeführten Gesetzmäßigkeiten erfüllen, bezeichnet man als *t-Normen* (\triangleq allgemeine Fassung der Konjunktion von Fuzzy-Mengen). Disjunktions-Operatoren, welche – wie die Durchschnittsoperatoren – die Kriterien der Assoziativität, Kommutativität, Identität und Monotonie erfüllen, bezeichnet man als *s-Normen* (bzw. *t-Conormen*)

Die Tabellen 2.1 und 2.2 zeigen einen Überblick über häufig verwendete Verknüfungsoperatoren der *t-Normen* und *s-Normen* (bzw. *t-Conormen*) [THI01].

Tabelle 2.1: Beispiele für t-Normen

t-Normen:	$\mu_{\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2}$	Wertebereich
Minimum (Zadeh)	$\min(a_1, a_2)$	
algebraisches Produkt	$a_1 \cdot a_2$	
Yager (konjunktiv)	$1 - \min\left(1, ((1 - a_1)^\omega + (1 - a_2)^\omega)^{\frac{1}{\omega}}\right) (*)$	$\omega \in]0, \infty[$
Hamacher	$\frac{a_1 \cdot a_2}{\gamma + (1 - \gamma) \cdot (a_1 + a_2 - a_1 \cdot a_2)} (*)$	$\gamma \in]0, \infty[$
Frank	$\log_s \left(1 + \frac{(s^{a_1} - 1) \cdot (s^{a_2} - 1)}{s - 1}\right) (*)$	$s \in]0, \infty[/ \{0\}$
Dubois, Prade	$\frac{a_1 \cdot a_2}{\max(a_1, a_2, \alpha)} (*)$	$\alpha \in]0, 1[$
mit: $a_1 = \mu_{\tilde{A}_1}(x)$ $(*)$ parametrisierte t-Normen $a_2 = \mu_{\tilde{A}_2}(x)$ \rightarrow Adaptionst�higkeit		

Tabelle 2.2: Beispiele für s-Normen (bzw. t-Conormen) [THI01]

s-Normen / t-Conormen:	$\mu_{\tilde{A}_1 \cup \tilde{A}_2}$	Wertebereich
Maximum (Zadeh)	$\max(a_1, a_2)$	
algebraische Summe	$a_1 + a_2 - a_1 \cdot a_2$	
Yager (disjunktiv)	$\min\left(1, (a_1^\omega + a_2^\omega)^{\frac{1}{\omega}}\right) (*)$	$\omega \in]0, \infty[$
Hamacher	$\frac{a_1 + a_2 - (2 - \gamma) \cdot a_1 \cdot a_2}{1 - (1 - \gamma) \cdot a_1 \cdot a_2} (*)$	$\gamma \in]0, \infty[$
Frank	$1 - \log_s \left(1 + \frac{(s^{1-a_1} - 1) \cdot (s^{1-a_2} - 1)}{s - 1}\right) (*)$	$s \in]0, \infty[/ \{1\}$
Dubois, Prade	$\frac{a_1 + a_2 - a_1 \cdot a_2 - \min(a_1, a_2, 1 - \alpha)}{\max(1 - a_1, 1 - a_2, \alpha)} (*)$	$\alpha \in]0, 1[$
mit: $a_1 = \mu_{\tilde{A}_1}(x)$ $(*)$ parametrisierte s-Normen bzw. t-Conormen $a_2 = \mu_{\tilde{A}_2}(x)$ \rightarrow Adaptionst�higkeit		

Das *Erweiterungsprinzip* ist ohne Zweifel das am meisten verwendete Basiskonzept der Fuzzy-Set-Theorie zur Generalisierung herkömmlicher mathematischer Konzepte [ZIM99b]. Grundlage des *Erweiterungsprinzips* bildet u. a. das von Zadeh bereits in [ZAD65] auf Fuzzy-Mengen erweiterte *kartesische Produkt*. Dieses erlaubt die Bildung von Operationen mehrerer über n verschiedene Grundmengen X_1, \dots, X_n definierter Fuzzy-Mengen $\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n$. Die Zugehörigkeitsfunktion der unscharfen Menge als Ergebnis des *kartesischen Produktes* im Produktraum $X_1 \times \dots \times X_n$ bestimmt sich gemäß Zadeh zu:

$$\mu_{\tilde{A}_1 \times \dots \times \tilde{A}_n}(x) = \min(\mu_{\tilde{A}_1}(x), \dots, \mu_{\tilde{A}_n}(x)) \quad (2.6)$$

bzw. verallgemeinert:

$$\tilde{A}_1 \times \dots \times \tilde{A}_n := \{(\mu_{\tilde{A}_1}(x), \dots, \mu_{\tilde{A}_n}(x)) \mid \mu_{\tilde{A}_1}(x) \in \tilde{A}_1 \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{A}_n}(x) \in \tilde{A}_n\} \quad (2.7)$$

Mit Hilfe des *Erweiterungsprinzips* lassen sich beliebige – durch die Funktion $f: X \rightarrow Y$ repräsentierte – mathematische Operationen auf unscharfe Mengen übertragen, was in der Praxis von großer Bedeutung ist. Die Beziehungen zwischen den Fuzzy-Mengen $\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n$ über den Grundmengen X_1, \dots, X_n werden auch als *(Fuzzy-)Relationen* bezeichnet. Mit Hilfe von *Relationen* können im Rahmen der Modellierung von WENN....DANN....Regeln mehrere Bedingungen miteinander verknüpft werden (Prämisse), um ein gemeinsames Resultat (Konklusion) zu evaluieren.

2.3.4 Regelbasierte Fuzzy-Systeme

Systeme, deren Verhalten durch die Auswertung von sprachlich formulierten Regeln bestimmt wird, - so genannte *regelbasierte Fuzzy-Systeme* – stellen den größten Teil der bislang in der Praxis angewandten Fuzzy-Systeme dar. Dabei ist ein Vorzug dieser Fuzzy-Systeme, dass die Regeln auf einer natürlichen Sprache basieren und intuitiv verständlich sind. Mit diesen Systemen ist es u. a. möglich, Expertenwissen in Form von Regeln zu formalisieren, um somit gesuchte Funktionsverläufe adäquat approximieren zu können [ZAD92].

Aus der Regel

„WENN die Belastungssteigerung ΔN klein ist UND die Höhenveränderung der Wand Δl_{col} klein ist UND die Ausnutzung des Querschnittes mittel ist UND die Schlankheit λ klein ist UND die Wanddicke h groß ist, DANN ist die Verbreiterung des Wandquerschnittes Δh klein“

Kann eine mathematische Gleichung der Form

$$\Delta h = f(\Delta N, \Delta l_{col}, \text{Ausnutzung}, \lambda, h) \quad (2.8)$$

extrahiert werden. Die allgemeine Vorgehensweise zur Umsetzung in eine mathematische Funktion kann grundlegend zusammengefasst werden zu:

- | | | |
|----------|---------------------|---|
| | 1. Fuzzyfikation: | Bestimmung der Wahrheitsgehalte $\mu_{\tilde{A}_{ij}}(x_i)$ eines jeden Eingangswertes |
| Inferenz | 2. Aggregation: | Ausführung aller UND-Verknüpfungen bzw. ODER-Verknüpfungen der Prämisse |
| | 3. Implikation: | Ausführung der WENN-DANN-Verknüpfung von Prämisse und Konklusion |
| | 4. Akkumulation: | Verknüpfung der Akkumulationsergebnisse zu einer Zugehörigkeitsfunktion μ_{res} |
| | 5. Defuzzyfikation: | Ermittlung eines festen Zahlenwertes x_{res} aus der Zugehörigkeitsfunktion μ_{res} der Ergebnismenge |

Diese transparent gestaltete Umsetzung findet sich in den meisten Regeltypen von Fuzzy-Systemen wieder. Diese Systeme beruhen auf der so genannten Regelbasis, die eine Menge j von WENN....DANN-Regeln R_j umfasst:

$$R_j : \text{WENN } x_1 \in \tilde{A}_1^j \text{ UND / ODER....UND / ODER } x_n \in \tilde{A}_n^j \text{ DANN } y \in \tilde{B}^j \quad (2.9)$$

mit: x_1, \dots, x_n linguistische Eingangsvariablen
 y linguistische Ausgabevariable
 $\tilde{A}_1^j, \dots, \tilde{A}_n^j, \tilde{B}^j$ Fuzzy-Mengen (als linguistische Terme), definiert durch
 Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_{\tilde{A}_1^j}, \dots, \mu_{\tilde{A}_n^j}$ bzw. $\mu_{\tilde{B}^j}$

Die *Fuzzy-Inferenz* bildet das Kernstück eines Fuzzy-Systems. Im Rahmen der *Inferenz* werden die einzelnen Bedingungen $x_i \in \tilde{A}_i^j$ zur Auswertung der Regelprämisse von R_j in Abhängigkeit der gewählten Operationsart miteinander verkettet. Mit dem sich aus dieser – als *Aggregation* bezeichneten – Auswertung ergebendem Akzeptanzgrad der Regelprämisse wird die zugehörige Fuzzy-Menge der Konklusion \tilde{B}_j verändert. Somit definieren sich die Regeln R_j als *Fuzzy-Implikation* $\tilde{A}_1^j \times \dots \times \tilde{A}_n^j \rightarrow \tilde{B}^j$ einer Fuzzy-Menge zu:

$$\mu_{\tilde{A}_1^j \times \dots \times \tilde{A}_n^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x_1, \dots, x_n, y) = \mu_{\tilde{A}_1^j}(x_1) * \dots * \mu_{\tilde{A}_n^j}(x_n) * \mu_{\tilde{B}^j}(y) \quad (2.10)$$

mit: (*) beliebiger Operator einer t- bzw. s-Norm in Abhängigkeit der Art der Verkettung

Im Rahmen der – als *Approximatives Schließen* bezeichneten – Auswertung dieser Systeme stehen zahlreiche mathematische Mechanismen für die Wahl des Implikationsoperators zur Bestimmung der durch die WENN-DANN-Verknüpfung induzierten *Possibilitätsverteilung* [ZAD78] zur Verfügung.

Im Wesentlichen unterliegt die regelbasierte Fuzzy-Logik der Dichotomie zwischen den in dieser Arbeit als *funktional* bzw. *logisch* bezeichneten Fuzzy-Modellen. Diese beiden Arten von Fuzzy-Modellen unterscheiden sich formal grundlegend in ihrer Wahl des Implikationsoperators bei der Ausführung der WENN-DANN-Verknüpfung. Dabei ist die Wahl des Fuzzy-Modells bzw. die Art der Implikation abhängig von der semantischen Zielsetzung und den Vorgaben im Rahmen der Formalisierung sowie der Auswertung. Dabei können Informationen aus allgemeingültigen Gesetzen bzw. Wissen [RBP98], [AYG97] oder aber auch durch Beobachtungen und Untersuchungen (Parameterstudien) gewonnen werden. Das Verhalten und die semantische Bedeutung regelbasierter Fuzzy-Systeme in Abhängigkeit der Wahl des Implikationsoperators wurde vor allem von Weisbrod

[WES98], [WEI98] sowie von Dubois, Prade und Ughetto verifiziert [DUP96], [UDP99], [DPU03].

Die Wahl der geeigneten Fuzzy-Regeln ist unter anderem auch abhängig von der vorhandenen Dateninformation sowie von der Art der Konklusion bzw. der Entscheidung. Auf der Grundlage vorhandener Beispiele bzw. Beobachtungen können mit Hilfe *funktionaler Fuzzy-Modelle* garantiert mögliche Werte bestimmt werden. Demgegenüber wird mittels Einschränkungen aus generellen Gesetzmäßigkeiten im Rahmen der Auswertung *logischer Fuzzy-Modelle* die Ergebnismenge der möglichen Werte durch Ausschluss unmöglicher Werte definiert [DHP00]. Letzteres gilt insbesondere bei unvollständigen Regelbasen. Die aus *funktionalen* und *logischen Fuzzy-Modellen* evaluierten Informationen werden daher auch oftmals als *positive* bzw. *negative Informationen* interpretiert [UDP99].

Abbildung 2.4 hebt anhand eines Beispiels für „scharfe“ Mengen noch einmal den Unterschied der beiden Arten von Fuzzy-Regeln hervor.

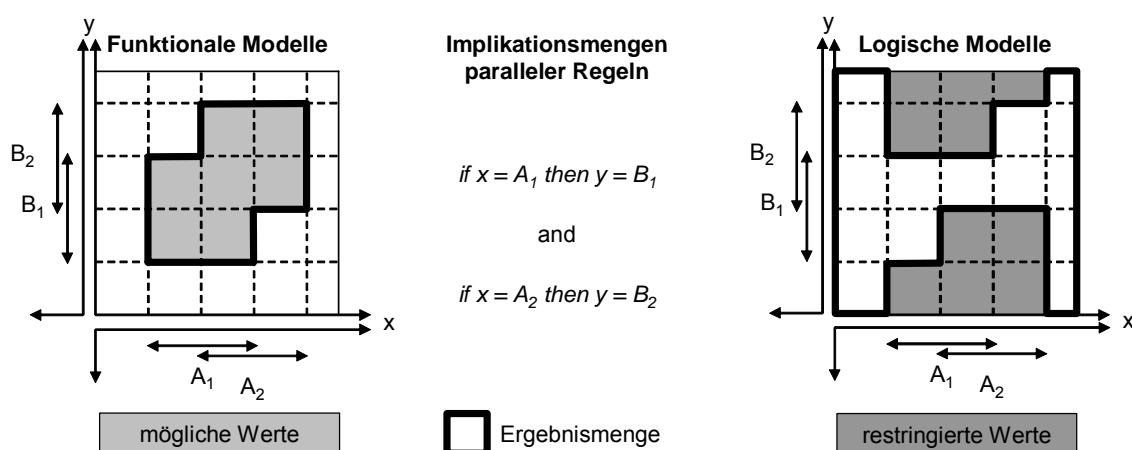


Abbildung 2.4: Beispielhafte Funktionsweise funktionaler und logischer Fuzzy-Modelle mit „scharfen“ Mengen

2.3.4.1 Logische Fuzzy-Modelle

Wissensteile, bei denen sich für das zugrunde liegende Problem ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit keine repräsentative Menge von Datensätzen erzeugen lässt, können mit funktionalen Fuzzy-Modellen nicht adäquat formalisiert werden. Das Wissen um die Zusammenhänge von Prämisse und Konklusion liegt bei dieser Art

der Problemstellung nicht in Form einer vollständigen (funktionalen) Abbildung, sondern lediglich für Teilbereiche vor. Ein Beispiel stellt die Sensitivitätsanalyse von Parameterveränderungen infolge Planungsänderungen dar. Aufgrund der fast unbegrenzten Anzahl von Möglichkeiten eventueller Planungsänderungen lässt sich in diesem Fall kein repräsentativer Datensatz erzeugen. Für die Formalisierung von generellen Gesetzmäßigkeiten (d.h. Wissen) sind die Regeln der formalen Logik zu beachten. Aus diesem Grund werden diese Modelle auch als logische Fuzzy-Modelle bezeichnet [DPU03], [FUL99], [KLN96]. Im Gegensatz zur Funktionsweise der zuvor erläuterten funktionalen Fuzzy-Modelle deutet man bei logischen Fuzzy-Modellen die Aussage „Wenn A, dann B“ als eine logische Verknüpfung. Dies bedeutet, dass die in den Wahrheitstafeln (siehe Tabelle 2.3) aufgeführten Forderungen erfüllt werden müssen. Dies wird mit den, im Rahmen der Auswertung funktionaler Fuzzy-Modelle verwendeten, Implikationsoperatoren nicht gewährleistet.

Tabelle 2.3: Darstellung möglicher Wahrheitswertzuordnungen zur Verfolgung von Verknüpfungen logischer Aussagen

A	B	$A \rightarrow B$	$\neg A \vee B$	$A \wedge B$
1	1	1	1	1
1	0	0	0	0
0	1	1	1	0
0	0	1	1	0

Infolge der Information „ Ω ist \tilde{A} “ (mit der Variablen Ω , die sich über die Grundmenge X erstreckt, wobei \tilde{A} eine Fuzzy-Menge von X darstellt) kann die semantische Beziehung zwischen der Possibilitätsverteilung $\pi_{\Omega(\rightarrow)}$ und der Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{A}}$ im Rahmen der Inferenz logischer Fuzzy-Modelle definiert werden zu:

$$\pi_{\Omega(\rightarrow)}(x) \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \mid \forall x \in X \quad (2.11)$$

Diese Ungleichung berücksichtigt die Eigenschaft logischer Fuzzy-Modelle, dass alle Werte außerhalb der Ergebnismenge definitiv ausgeschlossen werden können, während die Werte innerhalb der Ergebnismenge möglich sind. Die Aussage

„ Ω ist \tilde{A} “ wird daher auch als „*Es muss sein, dass Ω (in) \tilde{A} ist*“ gedeutet und repräsentiert infolge der Einschränkung *negative Information*. Das bedeutet, dass alles, was nicht ausgeschlossen wird, für möglich erachtet wird. Durch diese Einschränkung evtl. möglicher Werte durch den Ausschluss unmöglicher Werte wird die Ergebnismenge bei unvollständiger Regelbasis zwar mit Unsicherheit behaftet, jedoch werden die unmöglichen Werte mit Sicherheit ausgeschlossen.

Einzelne Informationselemente werden konjunktiv miteinander aggregiert. Hierfür wird zumeist der Minimum-Operator angewendet:

$$\pi_{\Omega(\rightarrow)}(x) \leq \min(\mu_{\tilde{A}_i}(x)) \mid \forall x \in X \quad (2.12)$$

Jede Regel „Wenn $\Omega = \tilde{A}^j$, dann $\Lambda = \tilde{B}^j$ “ (bezeichnet: $\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j$) mit den Eingangsvariablen Ω und den Ausgabevariablen Λ wird durch die Possibilitätsverteilung $\pi_{\Omega|\Lambda(\rightarrow)}^j$ repräsentiert, welche ebenfalls numerisch identisch zur Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}$ ist. Die Regeln der Regelbasis $\mathcal{K} = \{\tilde{A}_1^j \times \dots \times \tilde{A}_n^j \rightarrow \tilde{B}^j; j = 1, \dots, m\}$ aus m zusammengehörigen Fuzzy-Regeln werden im Rahmen der Verarbeitung *negativer Informationen* auch als *Einschränkungen* (Englisch: *Constraints*) bezeichnet. Daher muss auch die Fuzzy-Verknüpfung aus Prämisse und Konklusion „ \rightarrow “ mit einem mehrwertigen Implikationsoperator erfolgen. Die Akkumulation von Regeln logischer Fuzzy-Modelle schließt mögliche Ereignisse aus. Durch zusätzliche Informationen (Regeln) wird der Wertebereich der Konklusionsvariablen zunehmend eingeschränkt. Man spricht hierbei anstelle von *Informationen* auch von *Restriktionen*. Gemäß dem *Prinzip der minimalen Spezifität*, nach dem die Possibilitätsverteilung gerade so spezifisch sein soll, wie es die zur Verfügung stehenden Informationen erlauben, erfolgt daher eine konjunktive Kombination der negativen Informationen $\tilde{A}^j, j = 1, \dots, m$ [WEI98], [YAG83]. Die Possibilitätsverteilung $\pi_{(\rightarrow)}^{\mathcal{K}}$, welche die gesamte Regelbasis \mathcal{K} repräsentiert, definiert sich mit dem zumeist verwendeten Minimum-Operator zu:

$$\pi_{(\rightarrow)}^{\mathcal{K}} = \min_{j=1, \dots, m} \pi_{\Omega|\Lambda(\rightarrow)}^j \quad (2.13)$$

Die Verwendung des Minimum-Operators für die Akkumulation ermöglicht eine problemlose Erweiterung des Datensatzes. Durch den Minimum-Operator wird berücksichtigt, dass eine Regel die limitierende Funktion für alle noch möglichen Werte darstellt. Eine Regel stellt in diesem Fall ein Stück Wissen des Ingenieurs dar, welches eine Einschränkung aller möglichen Situationen darstellt. Ausgangsvariablen, welche bei einigen Regeln möglich sind, können von anderen Regeln evtl. nicht zugelassen werden.

Ein Possibilitätsgrad $\pi_{(\rightarrow)}^{\mathcal{K}}(x, y) = 0$ über den gesamten Definitionsbereich X bedeutet somit, dass x und y ein nicht mögliches Paar von Eingangs- und Ausgabevariablen repräsentiert. Andererseits bedeutet ein Possibilitätsgrad $\pi_{(\rightarrow)}^{\mathcal{K}}(x, y) = 1$ über den gesamten Definitionsbereich X , dass für Eingangswerte $X = x$ keine Regel in \mathcal{K} definiert wurde und somit keine Einschränkungen gegeben sind. Infolge der Erweiterung der Regelbasis mit neuen Regeln kann jedoch auch hierfür eine Restriktion definiert werden, so dass auch der Possibilitätsgrad $\pi_{(\rightarrow)}^{\mathcal{K}}$ Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Dies bedeutet, dass y in Bezug auf die vorhandene Regelbasis \mathcal{K} für x nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann. Die vorhandene Informationsbasis (Regelbasis) \mathcal{K} wird als „komplett“ bezeichnet, sofern nur ein möglicher Zustand als Ergebnis eines Eingangsereignisses existiert. Diese im Possibilitätsgrad $\pi_{(\rightarrow)}$ induzierte semantische Bedeutung ist von grundlegendem Unterschied zur Auswertung funktionaler Fuzzy-Modelle.

Logische Fuzzy-Modelle lassen sich in Abhängigkeit des verwendeten Implikationsoperators in wahrheits- und sicherheitsqualifizierende Modelle unterscheiden ([UDP99]: „gradual“ / „certainty“ – rules).

Wahrheitsqualifizierende Fuzzy-Regeln werden mit Hilfe sogenannter R-Implikationen modelliert [UDP99]. In ihrer semantischen Bedeutung kann hierbei die Regel „Wenn $x = \tilde{A}$, dann $y = \tilde{B}$ “ interpretiert werden zu „Je mehr $x = \tilde{A}$, desto mehr $y = \tilde{B}$ “ (Beispiel: „Je höher die Betongüte..., desto höher die Traglast....“). Der Wahrheitswert von $y = \tilde{B}$ steigt dabei an (d.h. die Konklusion wird präziser), wenn der Wahrheitswert von $x = \tilde{A}$ ansteigt [DUP92]. Für die Modellierung wahrheitsqualifizierender Regeln stehen beispielsweise R-Implikationsoperatoren nach Gödel, Goguen und Rescher/Gaines zur Verfügung.

Der *Gödel'sche Implikationsoperator* ist definiert durch:

$$\mu_{\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}}(x, y) = \begin{cases} 1 & , \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(y) \\ \mu_{\tilde{B}}(y) & , \mu_{\tilde{A}}(x) > \mu_{\tilde{B}}(y) \end{cases} \quad (2.14)$$

Abbildung 2.5 zeigt beispielhaft den Funktionsverlauf des Gödel-Operators. Dabei ist auf den erweiterten Bereich der Ursprungsmenge zu achten. Liegt der Wert für x_0 (Eingangswert) im sogenannten α -Schnitt der Fuzzy-Menge \tilde{A} [KAG85], so werden alle Werte für y im α -Schnitt der Fuzzy-Menge \tilde{B} als uneingeschränkt möglich erachtet. In diesem Bereich beträgt der Zugehörigkeitsgrad 1.

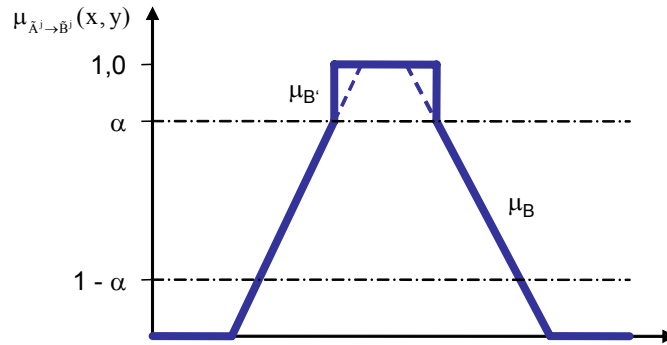


Abbildung 2.5: Funktionsverlauf bei Verwendung des Implikationsoperators nach Gödel

Der *Goguen'sche Implikationsoperator*

$$\mu_{\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}}(x, y) = \begin{cases} 1 & , \mu_{\tilde{A}}(x) = 0 \\ \min\left(1, \frac{\mu_{\tilde{B}}(y)}{\mu_{\tilde{A}}(x)}\right) & , \mu_{\tilde{A}}(x) \neq 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

wird als R-Implikation von der T-Norm $\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}} = \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(y)$ erzeugt.

Sofern nur scharfe Relationen zwischen den Variablen Ω und Λ angenommen werden, so kann der R-Implikationsoperator gemäß *Rescher/Gaines* verwendet werden:

$$\mu_{\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}}(x, y) = \begin{cases} 1 & , \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(y) \\ 0 & , \mu_{\tilde{A}}(x) > \mu_{\tilde{B}}(y) \end{cases} \quad (2.16)$$

Mit Hilfe sogenannter S-Implikationen werden sicherheitsqualifizierende Fuzzy-Regeln modelliert. In ihrer semantischen Bedeutung kann hierbei die Regel „Wenn $x = \tilde{A}$, dann $y = \tilde{B}$ “ interpretiert werden zu „Je mehr $x = \tilde{A}$, desto sicherer befindet sich y in \tilde{B} “ (Beispiel: „Je höher ein Gebäude ist, desto höher ist die Sicherheit, dass dieses schwingungsanfällig ist“). Ein abnehmender Zugehörigkeitsgrad führt demnach zu einem Unsicherheitsniveau in der Konklusion. Gleichzeitig beinhaltet die Regel, dass Gegenbeispiele eigentlich ausgeschlossen sind. S-Implikationen werden über die Bestimmungsgleichung $\tilde{A} \rightarrow \tilde{B} = \neg \tilde{A} \vee \tilde{B}$ definiert. Für die Modellierung wahrheitsqualifizierender Regeln stehen beispielsweise S-Implikationsoperatoren nach *Kleene/Dienes* und *Reichenbach* zur Verfügung.

Verwendet man in der Bestimmungsgleichung für S-Implikationen den Zadeh'schen Negationsoperator $\mu_{\neg \tilde{A}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x)$ zur Bestimmung der Zugehörigkeitsgrade der Menge $\neg \tilde{A}$ und den Maximum-Operator für die ODER-Verknüpfung (S-Norm), so erhält man den Operator nach *Kleene/Dienes*:

$$\mu_{\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}}(x, y) = \max(1 - \mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)) \quad (2.17)$$

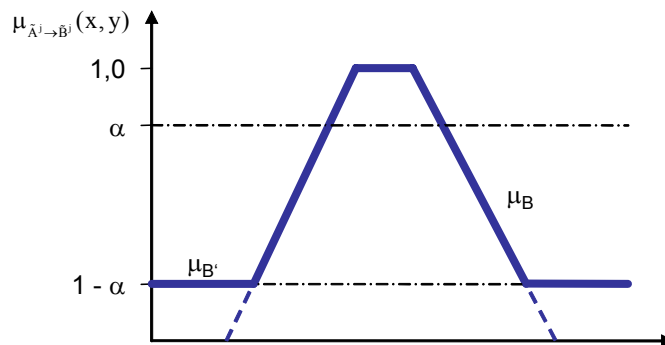


Abbildung 2.6: Funktionsverlauf bei Verwendung des Implikationsoperators nach *Kleene/Dienes*

Hierbei wird berücksichtigt, dass für Eingangswerte x_0 , die sich außerhalb der Fuzzy-Menge \tilde{A} befinden, Werte von y außerhalb des Supports von \tilde{B} nicht völlig ausgeschlossen werden können. Interpretiert man die Regel im Sinne von „Wenn $x = \tilde{A}$, dann ist $y = \tilde{B}$ mit einer Sicherheit von $\mu_{\tilde{A}}(x_0)$ “, so bedeutet dies, dass für Werte x außerhalb des Kerns von \tilde{A} , Werte y außerhalb des Supports von \tilde{B} mit

einem Zugehörigkeitsgrad von $1 - \mu_{\tilde{A}}(x_0)$ für möglich erachtet werden. Abbildung 2.6 zeigt die prinzipielle Funktionsweise des Operators.

Der *Reichenbach'sche Implikationsoperator* bestimmt sich aus dem Zadeh'schen Negationsoperator $\mu_{\neg\tilde{A}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x)$ zur Bestimmung der Zugehörigkeitsgrade der Menge $\neg\tilde{A}$, sowie der S-Norm $\mu_{\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}} = \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(y) - \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(y)$ zu:

$$\mu_{\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}}(x, y) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(y) \quad (2.18)$$

Der Implikationsoperator gemäß *Lukasiewicz* vereinigt die Repräsentationsformen wahrheits- und sicherheitsqualifizierender Regelverarbeitung. Er addiert zu einem Unsicherheitsniveau eine Vergrößerung des Kernstückes der Ausgangsmenge [DUP99]. Dies steht im Gegensatz zum Implikationsoperator von *Gödel*, der im gesamten erweiterten Bereich keine Unschärfe zulässt. Die Herleitung des *Lukasiewicz-Implikationsoperators* unterscheidet sich gegenüber dem *Kleene-Dienes-Implikationsoperator* in der Operatorwahl für die ODER-Verknüpfung (hier:

S-Norm von Yager: $\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}} = \min\left(1, (\mu_{\tilde{A}}(x)^\omega + \mu_{\tilde{B}}(y)^\omega)^{\frac{1}{\omega}}\right)$ mit $\omega = 1, 0$):

$$\mu_{\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}}(x, y) = \min(1, 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(y)) \quad (2.19)$$

Der erweiterte Kern als Implikationsergebnis ist in Abbildung 2.7 zu sehen.

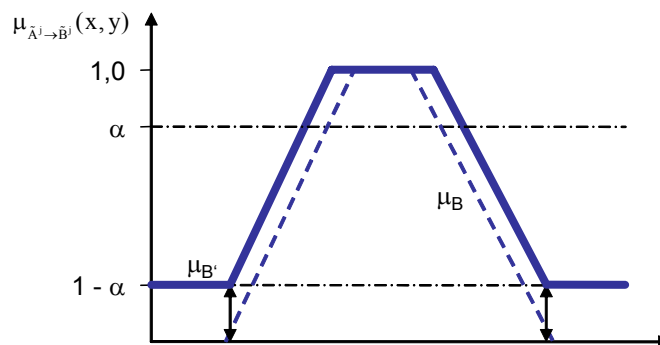


Abbildung 2.7: Funktionsverlauf bei Verwendung des Implikationsoperators nach *Lukasiewicz*

Der Fuzzy-Inferenzmechanismus unterteilt sich in zwei grundlegende Prinzipien. Bei der Anwendung des *FATI*-Prinzips (*First Aggregate Then Infer*) werden zunächst die Relationen aus jeder Regel zu einer „*Superrelation*“ [THI01] aggregiert. Im Anschluss erfolgt die regelbezogene Inferenz. Beim *FITA*-Prinzip (*First Infer Then Aggregate*) wird die Inferenz für jede einzelne Regel $1, \dots, m$ unter Berücksichtigung des Eingangswertes angewendet und die daraus resultierenden Ergebnisse im Anschluss aggregiert bzw. akkumuliert. Während bei der Anwendung *funktionaler Fuzzy-Modelle* unter Verwendung des Minimums- bzw. Produktoperators die Ergebnisse der beiden Prinzipien *FITA* und *FATI* identisch sind [FUL99], muss im Rahmen der Anwendung logischer Fuzzy-Modelle die Art der Eingangswerte unterschieden werden. Infolge der konjunktiven Verknüpfung logischer Fuzzy-Regeln bilden Ergebnisse, die durch die Anwendung des (globalen) *FATI*-Prinzips erzielt werden, eine Teilmenge der Ergebnisse, die mit Hilfe des *FITA*-Prinzips resultieren [ALB02]. Zur Sicherstellung der Kohärenz der Regelbasis \mathcal{K} (siehe Kapitel 5.1.4) sollte im Fall unscharfer Eingangswerte das Prinzip *FATI* angewendet werden, während bei scharfen Eingangswerten (und im Speziellen bei sicherheitsqualifizierenden Modellen) die Anwendung des *FITA*-Verfahrens empfohlen wird [DPU97].

Im Rahmen dieser Arbeit werden *logische Fuzzy-Modelle* beispielhaft zur Approximation geometrischer Auswirkungen auf Wandkonstruktionen infolge einer Last- und/oder Geometrieveränderung eingesetzt. Hierbei werden scharfe Eingangswerte zugrunde gelegt. Daher wird in dieser Arbeit das *FITA*-Prinzip für die Fuzzy-Inferenz angewendet. Abbildung 2.8 verdeutlicht noch einmal die Funktionsweise *logischer Fuzzy-Modelle* beispielhaft für die Anwendung des *Kleene/Dienes-Implikationsoperators*. Zu beachten sind dabei die Implikationsergebnisse der einzelnen Regeln. Da beispielsweise in Regel 1 der kleinste Zugehörigkeitsgrad $\mu_{\Delta N \cap \lambda} = 0,7$ beträgt (Aggregation: Minimum-Operator), entsteht in der Ergebnismenge ein waagerechter Verlauf mit dem Zugehörigkeitsgrad $1 - 0,7 = 0,3$. Dieser Bereich repräsentiert Werte, welche vom Fuzzy-System auf Grundlage der Regel 1 nicht ausgeschlossen werden können.

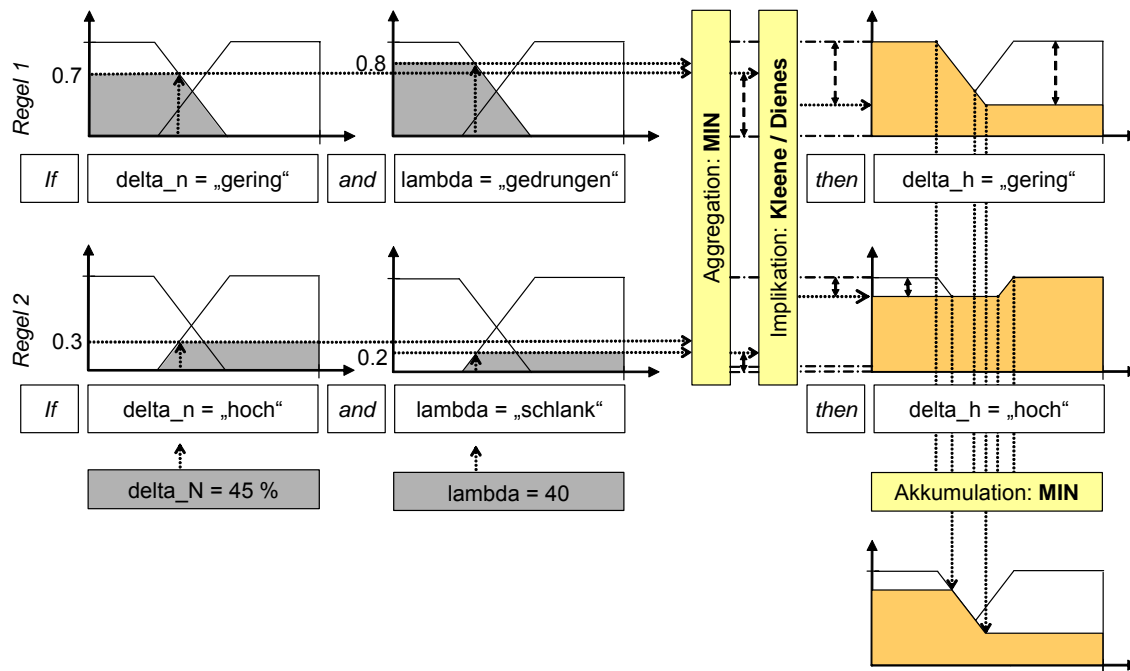


Abbildung 2.8: Funktionsweise der Inferenz logischer Fuzzy-Modelle unter Verwendung des Kleene/Dienes-Implikationsoperators mit dem Prinzip FITA

2.3.4.2 Funktionale Fuzzy-Modelle

Durch die Bestimmung einer Ergebnismenge auf der Grundlage von Beispielen bzw. Beobachtungen wird die *Möglichkeit* der Existenz denkbarer Werte im Rahmen der Regelverarbeitung bei *funktionalen Fuzzy-Modellen* garantiert. Die Aussage „Wenn $x = \tilde{A}$, dann $y = \tilde{B}$ “ wird in diesem Zusammenhang als eine funktionale Zuordnung von Werten des Definitionsbereichs von \tilde{A} zu Werten des Definitionsbereichs von \tilde{B} ausgelegt. Die Implikation erfolgt hierbei mit Hilfe eines t-Norm-Operators. Die semantische Beziehung zwischen der Possibilitätsverteilung $\pi_{\Omega(\wedge)}$ und der Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{A}}(x)$ (siehe Kapitel 2.3.4) im Rahmen der Inferenz *funktionaler Fuzzy-Modelle* wird daher definiert zu:

$$\pi_{\Omega(\wedge)}(x) \geq \mu_{\tilde{A}}(x) \mid \forall x \in X \quad (2.20)$$

Diese Ungleichung berücksichtigt die Eigenschaft funktionaler Fuzzy-Modelle, dass alle Werte innerhalb der Ergebnismenge garantiert möglich sind, während die Werte

außerhalb der Ergebnismenge nicht definitiv ausgeschlossen werden können. Die Aussage „ Ω ist \tilde{A} “ wird daher auch als „*Es kann sein, dass Ω (in) \tilde{A} ist*“ gedeutet. Beispielsweise enthält die Aussage „*Je niedriger ein Gebäude ist, desto größer ist die Möglichkeit, dass dieses nicht schwingungsanfällig ist*“ im Gegensatz zu negativen Informationen bzw. Restriktionen *logischer Fuzzy-Modelle* keine Einschränkung. Trotz einer niedrigen Höhe ist es möglich, dass ein Gebäude schwingungsanfällig ist. Dies ist weniger wahrscheinlich aber nicht auszuschließen. Diese Form der Regelverarbeitung wird daher auch als *möglichkeitsqualifizierend* interpretiert.

Die Akkumulation von Regeln *funktionaler Fuzzy-Modelle* erweitert die Menge möglicher Ereignisse auf der Grundlage von Beispielen und Beobachtungen. Infolge der „*Closed-World-Annahme*“ (CWA), welche besagt, dass ein Ereignis für falsch anzunehmen ist, sofern dessen Auswertung in der Regelbasis nicht als wahr bekannt ist, erfolgt eine disjunktive Kombination der als *positiv* bezeichneten Informationen \tilde{A}^j , $j=1, \dots, m$. Die Possibilitätsverteilung $\pi_{(\wedge)}^{\mathcal{K}}$, welche die gesamte Regelbasis \mathcal{K} repräsentiert, definiert sich mit dem zumeist verwendeten Maximum-Operator zu:

$$\pi_{(\wedge)}^{\mathcal{K}} = \max_{j=1, \dots, m} \pi_{\Omega | \wedge (\wedge)}^j \quad (2.21)$$

Die am häufigsten verwendeten *funktionalen Fuzzy-Modelle* stellen das Mamdani/Assilian-Modell (MA-Modell) sowie das Takagi/Sugeno/Kang-Modell (TSK-Modell) dar.

Kennzeichnend für das von Mamdani und Assilian für die Regelung einer Dampfmaschine entwickelte MA-Modell [MAA75] ist der für die konjunktiven Verknüpfungen der einzelnen Kompatibilitätsgrade der Prämisse sowie für die Implikation verwendete Minimum-Operator:

$$\mu_{\tilde{A} \wedge \tilde{B}}(x, y) = \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)) \quad (2.22)$$

Durch die Verwendung des Minimum-Operators im Rahmen der Implikation erfolgt eine Begrenzung („Kappen“) der betreffenden Ergebnismenge. Durch die Verwendung unterschiedlicher t-Normen für Aggregation und Implikation wurden auch abgewandelte MA-Modelle erarbeitet [UDP99]. Im Normalfall liefern mehrere

Regeln R_i einer Regelbasis \mathcal{K} Konfidenzgrade infolge Aggregation und Implikation von $\mu > 0$. Die Verknüpfung bzw. die Akkumulation der Implikationsergebnisse aller Regeln erfolgt größtenteils mittels des Maximum-Operators. Daher zeichnen sich Fuzzy-Ergebnismengen des MA-Modells gegebenenfalls durch ihre „gebirgige“ Erscheinungsform aus. Im Fall von Fuzzy-Control [DRE96] wird zumeist ein scharfer Wert als Ergebnis des Fuzzy-Modells benötigt. Dieser Wert wird aus der akkumulierten Fuzzy-Ergebnismenge durch Defuzzifikation gewonnen.

Für die Erleichterung der Erstellung von Fuzzy-Regeln anhand von Datensätzen entwickelten Takagi, Sugeno und Kang ein Fuzzy-Modell, welches sich im Aufbau der Konklusionsseite der Fuzzy-Regeln gegenüber dem MA-Modell unterscheidet. Hier werden den Ausgangsgrößen keine Fuzzy-Mengen sondern polynomische Funktionen, im Allgemeinen nullten oder ersten Grades, zugeordnet, die in Abhängigkeit von den Eingangswerten und den zugehörigen Regeln numerische Werte liefern:

$$\text{WENN } x_1 = LW_{1,j} \text{ UND } \dots \text{ UND } x_n = LW_{n,j}, \text{ DANN } y_i = f_i(x_1 \dots x_n)$$

Infolge der Auswertung liegt kein stetiges dimensionsgebundenes Ergebnis vor, sondern es wird vielmehr eine Klassifizierung möglicher Ausgangswerte vorgenommen. Auch in diesem Modell wird für die konjunktive Verknüpfung der einzelnen Kompatibilitätsgrade (Aggregation) i.d.R. der Minimum-Operator verwendet. Somit verlaufen Fuzzyfikation und Aggregation analog zum MA-Modell. Implikation, Akkumulation und Defuzzifikation erfolgen dagegen beim TSK-Modell innerhalb eines Vorgangs. Die daraus hervorgehenden Ausgangswerte f_i eines solchen TSK-Modells mit m Regeln werden mit eigens hierfür definierten Operatoren ermittelt [KUN00].

Funktionale Fuzzy-Modelle werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verwendet und verifiziert. Es wird daher an dieser Stelle auf eine detailliertere Beschreibung dieser Modelle verzichtet.

KAPITEL 3

STAND DER FORSCHUNG

Die Grundlage der vorliegenden Arbeit bilden informationsverarbeitende Ansätze zur Formalisierung von Norminformationen sowie Repräsentation von Expertenwissen. Im Folgenden werden die wichtigsten Arbeiten zu diesen als *wissensbasiert* bezeichneten Ansätzen zusammengefasst. Daran anschließend werden ausgewählte Modelle zur Wissensverarbeitung mit Methoden der Fuzzy-Logik vorgestellt und analysiert, bevor am Ende dieses Kapitels der Stand der Forschung kooperationsunterstützender Ansätze aufgezeigt wird.

3.1 Wissensbasierte Ansätze

Zu Beginn der 60er Jahre wurden erstmalig Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) als Problemlösungsansätze entwickelt [SIN63]. Mit Hilfe von Ansätzen zur Problemreduktion wurden Systematiken für die Lösung nicht analytischer Probleme entwickelt. Zu diesem Zweck wurden Gesamtproblemstellungen in einzelne Teilprobleme zerlegt und rechnerbasiert formalisiert. Diese Programme wurden als *General Problem Solvers (GPS)* bezeichnet.

Erst durch die programminterne Trennung von Fachwissen und anwendungs-unabhängigen Problemlösungsstrategien wurden die – mit heutigen Ansätzen vergleichbaren – *wissensbasierten Systeme* entwickelt.

Erste, durchgängig objektorientierte Ansätze für die Wissensrepräsentation im Rahmen der Nachweisführung im konstruktiven Ingenieurbau wurden von Garrett und Hakim mit dem *Object Oriented Model (OOM)* erarbeitet. Die verschiedenen im Rahmen einer Norm verwendeten Methoden zur Ermittlung von Werten wurden dabei mittels verschiedener Klassen formalisiert [GAH92].

Das *Objektorientierte Wissensrepräsentationsmodell (OWM)* von Holéwik [HOL96] verwendet für die Formalisierung des Wissens eine Modellunterteilung in ein *Produktmodell*, ein *Nachweisparametermodell* und ein *Wissenselementmodell*. Das *Produktmodell* des *OWM* besitzt eine tiefere Hierarchie gegenüber dem des *OOM* von Garrett und Hakim.

Das von Yabuki und Law entwickelte *Object-Logic Model (OLM)* verwendet für die Repräsentation des Normwissens eine kombinierte Form aus objektorientierter Wissensrepräsentation und logikorientiertem Formalismus [YAL93]. Werte können mit Hilfe der im *OLM* implementierten *method objects* zwar aus Formeln und Tabellen ermittelt werden, andere Methoden, beispielsweise zur Bestimmung eines Diagrammwertes, sind jedoch nicht vorgesehen. Für die adäquate Modellierung komplexer Entscheidungsprozesse reichen die in den *method objects* zur Darstellung der Vorschriften verwendeten *determinants* jedoch nicht aus.

Han stellt in [HAN00] ein Modell zur Konsistenzanalyse des architektonischen Entwurfs vor. Mit Hilfe des *design-intent model (ADAAG)*, in dem die auf Vorschriften basierenden Methoden zur Überprüfung der Nutzungsplanung vorgehalten werden, wird der Gebäudegrundriss auf seine Konsistenz hin analysiert. Die Ergebnisse werden in den Instanzen eines separaten *Produktmodells* abgelegt. Inkonsistenzen werden dem Anwender im *document model* angezeigt.

Allen aufgeführten Modellen ist gemeinsam, dass sie nicht die Erfordernisse einer vernetzten Umgebung berücksichtigen. Die in einem verteilten Planungsprozess mit verschiedenen Fachgebieten auftretenden Abhängigkeiten werden nicht bzw. nur unzureichend erfasst. Eine Unterstützung komplexer Entscheidungsprozesse wird nicht bereitgestellt.

Wissensverarbeitung mit Methoden der Fuzzy-Logik

Hybride Systeme infolge der Kombination wissensbasierter Systeme mit weiteren Methoden aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (Fuzzy-Logik, Neuronale

Netze, etc.) bieten vielversprechende Ansätze zur Lösung komplexer Problemstellungen [GOO95]. Der Vorteil des Einsatzes von Fuzzy-Modellen gegenüber anderen Methoden – wie beispielsweise Neuronalen Netzen oder herkömmlichen, regelbasierten Modellen – besteht in ihrer Transparenz. Rein regelbasierte Modelle benötigen im Allgemeinen eine deutlich größere Anzahl an Regeln, um eine ähnliche Klassifikationsgüte wie Fuzzy-Modelle zu erreichen [ALB02].

Die Kombination wissensbasierter Systeme mit Methoden der Fuzzy-Logik wurde beispielsweise von Herrmann in [HER96] oder aber auch von Outram in [OUT97] im Bereich der medizinischen Forschung erfolgreich eingesetzt. Aber auch im Fachgebiet des Ingenieurbaus wurden bereits unscharfe Methoden zur Formalisierung von Ingenieurwissen angewendet.

Das Fuzzy-Expertensystem PLURIS+ von Döbbelin [DOE00] unterstützt den Anwender bei der Bewertung und Abschätzung des Risikopotentials zu untersuchender Baumaßnahmen im Spezialtiefbau. Neben weiteren wissensbasierten Systemen für die Risikoanalyse im Bereich der Geotechnik mit Hilfe unscharfer Mengen [SCH99] wurde die Synthese aus wissensbasierten Systemen und Elementen der Fuzzy-Logik vorwiegend in der Sicherheitsbeurteilung [JEN98] und Schadensdiagnostik [ZHC02] von Tragwerken erfolgreich eingesetzt. Lücken stellt in [LUE04] ein Modell zur Schadensanalyse von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken vor, mit dessen Hilfe Schadensbilder analysiert werden können. Das entwickelte Konzept wurde auf der Grundlage einer regelbasierten und objektorientierten Wissensrepräsentationsform in die Expertensystemshell *Jess* [FRI01] mit einer Erweiterung *FuzzyJ* [ORC01] implementiert. Die Unschärfen und Unsicherheiten bei der Schadensdiagnose werden hierbei durch die Bestimmung einer Wahrscheinlichkeit des Zutreffens für jede ermittelte Schadensursache ausgedrückt.

In [SFA02], [ALB02] wird das *Objektorientierte Fuzzy-Wissensrepräsentationsmodell (OFWM)* vorgestellt, welches die Formalisierung von Entwurfs- und Bemessungswissen im Stahlbetonhochbau ermöglicht. Als Grundlage dient hierbei u. a. das in [SCH91] entwickelte System zur Integration und Steuerung computerbasiert bearbeiteter Tragwerksentwürfe des Stahlbetonbaus, welches auf einem 3D-Datenmodell zur Beschreibung der Bauwerks- und Systeminformationen basiert. Weitere Grundlagen des *OFWM* bilden das *OOM* [GAH92], das *OLM*

[YAL93] sowie vor allem das *OWM* [HOL96]. Das *OFWM* von Albert gliedert sich ebenfalls in Teilmodelle. Das *Modell der Elemente einer Wissensbasis (MEW)* enthält Klassen der für den Entwurfs- und Bemessungsprozess erforderlichen Wissens Elemente. Das *Produktmodell (PM)* dient der Strukturierung dieser Wissens Elemente. Für die Repräsentation komplexen Entwurfswissens hinsichtlich der Anwenderunterstützung im Rahmen der Systemwahl von Stahlbeton-Deckensystemen sowie der Dimensionierung zugehöriger Unterzüge verwendet Albert ebenfalls Elemente der Fuzzy-Logik.

Von allen aufgeführten Modellen weist das *OFWM* von Albert die adäquateste Struktur der Wissensrepräsentation auf. Das erarbeitete *Modell der Elemente einer Wissensbasis (MEW)* erfasst die Abhängigkeiten der einzelnen Berechnungselemente im Rahmen der Inferenz untereinander. Die einzelnen Nachweise erfolgen zum Großteil auf der untersten Produktmodellklasse, der Bemessungsstelle einer jeden Bauteilinstanz. Das bauteilübergreifende Zusammenwirken tragender Bauteile – speziell auf gleichwertiger Produktmodell-Klassenhierarchie – wird jedoch nicht berücksichtigt. Das Produktmodell ist auf die Anforderungen im Rahmen des Stahlbetonhochbaus beschränkt und weist daher keinerlei Elemente anderer Gewerke auf. Gewerkeübergreifende Abhängigkeiten infolge verschiedener am Projekt beteiligter Fachplaner, sowie die Anforderungen für Planungsprozesse in einer vernetzt-kooperativen Umgebung werden im *OFWM* nicht berücksichtigt.

3.2 Kooperationsunterstützende Ansätze

Eine gemeinsame Bearbeitung von Planungsobjekten wird mit Hilfe *kooperationsunterstützender Ansätze* realisiert. In so genannten *Blackboard-basierten Ansätzen* [NII86] dient eine gemeinsame zentrale Datenbasis dazu, Informationen und Wissen im Rahmen eines Planungsprozesses zu verwalten. Zur Sicherstellung der Konsistenz des Planungsobjektes muss eine Koordination der Zugriffe aus verschiedenen Objekteinheiten der Planungsbeteiligten erfolgen. Dies erfolgt bei *Blackboard-Systemen* mit Hilfe einer separaten Kontrollkomponente. Die Integration über eine gemeinsame Datenbasis setzt hierbei ein ganzheitliches Modell voraus, welches die Anforderungen (Teilmodelle) der an der Planung beteiligten Einheiten vereinigt. Erst durch die Formalisierung von *Constraints (Bedingungen)* erfolgt die Integration der Wissensrepräsentation [PUP88] in Systeme mit

gemeinsamer Datenbasis. *Constraints* werden hierbei u. a. zur Aufdeckung und Abwicklung der im Rahmen einer kooperativen Planungsumgebung auftretenden Planungskonflikte eingesetzt. Um verteilt angeordnete Komponenten (Objekte der Projektbeteiligten) zu einem virtuellen Planungsinstrument für den gemeinsamen Planungsprozess integrieren zu können, ist es erforderlich, dass alle Einzelsysteme auf die aktuellen Planungsinformationen, welche in einer zentralen Datenbasis enthalten sind, zugreifen können. Beispielsweise ermöglicht die *CORBA*- oder *SOAP-Technologie*, Modelle in Computer-Netzwerken so vorzuhalten, dass beliebige Programmsysteme über festgelegte Schnittstellen darauf zugreifen können [PCG04].

Messner et al. stellt in [MES93] ein *Blackboard-basiertes System* für die Planung von Stahlbeton-Fertigteil-Bauwerken vor. Mit dem *CMPS (Construction and Manufacturing Planning System)* wird der Schwerpunkt auf ein ganzheitliches (Produkt)Modell für die Fertigteilplanung – ohne Berücksichtigung von Wissens-elementen – mit mehreren Projektbeteiligten realisiert.

Auf der Basis des *GUIDE Modells (Globally Unified Interactive design and Evaluation)* wird der geometrische Entwurf von Stahlbühnen unterstützt [MOH91]. Das Modell beinhaltet rudimentäre Möglichkeiten zur automatisierten Aufdeckung und Auflösung von Planungs-Konflikten auf der Grundlage geometrischer Informationen.

Ito schlägt in [ITO93] neben der Existenz einer zentralen objektorientierten Produktmodell-Instanz als Grundlage der konsistenten Verwaltung von Planungs- und Ausführungsinformationen einen *Constraint-Management-Zyklus* vor, mit dessen Hilfe die Prozesse im Rahmen von Konflikten zwischen den Projektbeteiligten gesteuert werden.

Das Kooperationsmodell *INDUSYS (Industrie-Systeme)* [BRE98] dient zur Formalisierung von Prozessabläufen im Zuge der Tragwerksplanung von Stahlhochbauprojekten. In *INDUSYS* wird eine strikte Trennung zwischen Produkt- und Prozessmodellierung vorgenommen. Sämtliche Produktdaten werden im *PLAKON-Modell (Integrierte Planung und Konstruktion von Tragwerken im industriellen Stahlhochbau)* vorgehalten, während alle prozessbasierten Daten mit Hilfe des *COOPERATE-Modells (Computer unterstütztes objektorientiertes Modell zum Planen und Entwerfen von Tragwerken im Team)* formalisiert werden

[BRH95]. Die Kommunikationsinfrastruktur der verteilt angeordneten Planer basiert auf der *CORBA*-Plattform. Die für die Nachweisführung erforderlichen Variablen werden mit Hilfe externer Module vorgehalten.

In [PET02] stellt Petersen ein netzwerkbasiertes Bussystems zur Optimierung des Energiehaushaltes baulicher Anlagen im Rahmen der Planungsphase vor. Für die Verwendung fachspezifischer Aufgaben tauschen die verteilte Komponenten mit Hilfe der Middleware-Technologie *CORBA* Planungsinformationen ganz oder teilweise untereinander aus. Petersen verwendet innerhalb des von ihm entwickelten Programmsystems *VAMOS* (*Verteilte Applikation zur Modellierung und Optimierung bauphysikalischer Systeme*) für das Führen der bauphysikalischen Nachweise eine prozedurale Form der Wissensrepräsentation [ALB92].

Soshnikov nutzt ebenfalls die *CORBA* Client/Server-Architektur für die Kommunikation zwischen den Systeminstanzen seines in [SOS00] vorgestellten Software-Toolkits für verteilte Wissensbanken im Planungsprozess. Innerhalb dieser komponentenbasierten Applikation wird im Gegensatz zum System *VAMOS* eine deklarative Form der Wissensrepräsentation verwendet [SOS00]. Zur Unterstützung des Planungsprozesses werden jedoch lediglich Regeln und Frames verwendet, was sich für die Wissensmodellierung im Rahmen der Nachweisführung bereits in früheren Arbeiten als nicht ausreichend erwiesen hat [SCH91]; [GAH92]; [HOL96]; [ALB02]. Wie aber auch bei den Programmsystemen *INDUSYS* und *VAMOS* werden die fachübergreifenden Abhängigkeiten der diversen – am kooperativen Planungsprozess beteiligten – Gewerke nicht in adäquater Weise berücksichtigt.

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP1103 *Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau* der Deutschen Forschungsgemeinschaft [DFG--] wurden unterschiedliche kooperationsunterstützende Ansätze erarbeitet. Alda, Radetzki, Won und Cremers schlagen beispielsweise eine komponentenbasierte anpassbare und verteilte Software-Plattform auf Basis eines vom klassischen System der Client-Server-Beziehung abweichenden *P2P-Netzwerks* (*Peer-to-Peer*) vor [ALD05]. Die Integration von Wissen bezüglich der Abhängigkeiten der Projektbeteiligten eines Planungsprozesses wird hierbei berücksichtigt, es werden jedoch keine Ansätze zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung aufgezeigt.

Allen aufgeführten Arbeiten ist gemeinsam, dass sie keine Grundlagen eines geschlossenen Ansatzes für eine wissensbasierte Modellierung vernetzt-kooperativer Planung unter Berücksichtigung gewerkeübergreifender Abhängigkeiten aufweisen.

KAPITEL 4

MORLA-MODELL

In diesem Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte *Multi-Objective Representation of Knowledge and its Applications – Modell* (MORLA-Modell) vorgestellt. Das erarbeitete domänenübergreifende Wissensrepräsentationsmodell dient zur Formalisierung des Nachweis- und Bemessungswissens sowie des Änderungsmanagements innerhalb einer vernetzt-kooperativen Planungsumgebung.

Das hier erarbeitete Wissensrepräsentationsmodell MORLA für eine verteilte Planungsumgebung besteht, wie auch bereits das OFWM [ALB02] und das OWM [HOL96] aus Teilmodellen. Die grundlegende Modellstruktur ist Abbildung 4.1 zu entnehmen.

Diese Aufteilung gliedert sich einerseits in die Produktmodellierung. Es wurde ein *Produkt-Daten-Modell* (*Product-Data-Model - PDM*) erarbeitet, welches die Belange von Bauteilen unterschiedlicher Gewerke sowie insbesondere deren Konfliktbereiche (z.B. Wanddurchbrüche) berücksichtigt. Beispielhaft wurden in dieser Arbeit die für die Gewerke der Tragwerksplanung (Bereich Stahlbetonbau) und Haustechnik (Bereich Raumluftechnik) erforderlichen Produktinformationen erfasst. Gleichzeitig wurden prozessbezogene Anforderungen der verteilten Planungsumgebung (Änderungsmodelle, Sperrmechanismen, Planungshistorie etc.) berücksichtigt. Mit Hilfe einer im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erarbeiteten Applikation wird unter Zugrundelegung der Struktur des PDM das *Gebäude-Informationen-Modell* (*Building-Information-Model - BIM*) generiert.

Den zweiten Teil bildet die Wissensmodellierung. Hier werden mit Hilfe einer prototypisch entwickelten Applikation (*Wissenserwerbskomponente*) auf der Grundlage des erarbeiteten *Wissens-Daten-Modells (Knowledge-Data-Model - KDM)* die gewerkebezogenen *Wissensbanken* generiert. Die *Berechnungselemente (BE)* der *Wissensbanken* werden dabei entsprechend dem *PDM* hinsichtlich ihrer Anwendung strukturiert abgelegt. Mit Hilfe des in den *Wissensbanken* formalisierten Wissens können gewerkeübergreifende Planungsprozesse ausgeführt werden, die den Fachplaner sowohl bei der Nachweisführung, als auch bei der Approximation von Konsequenzen aus Planungsmodifikationen unterstützen. Im Gegensatz zu vorangegangenen Arbeiten berücksichtigt das erarbeitete Wissensmodell Anforderungen, welche sich speziell im Rahmen einer verteilten Planungsumgebung (Mehrbenutzer-Fähigkeit; öffentliche / private Wissensrepräsentation; prozess-basierende Nachweisführung etc.) ergeben.

Unter Verwendung der gewerkebezogenen Wissensbanken wird das BIM mittels der *Inferenzkomponente* auf seine Konsistenz hin verifiziert.

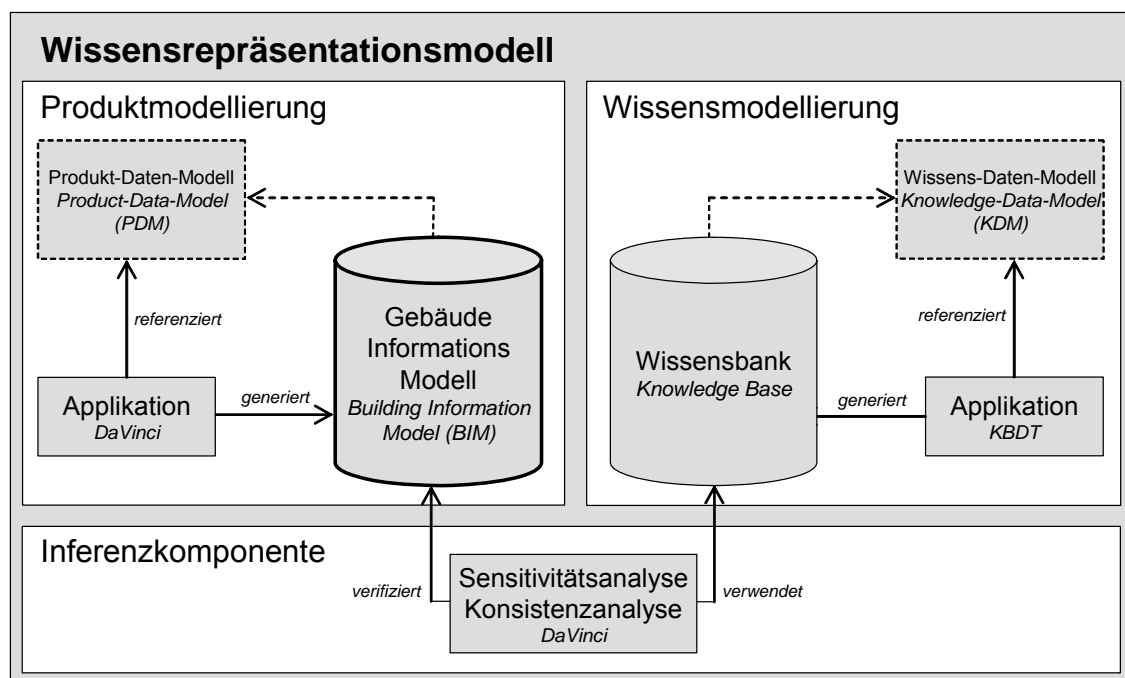


Abbildung 4.1: Modellstruktur des *MORLA-Modells*

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modelle im Einzelnen erläutert. Zur Verdeutlichung der grundlegenden Funktionsweise wird

zuvor die Systemarchitektur in verteilter Umgebung vorgestellt sowie die Vorgehensweise bei der verteilten Modellbearbeitung eingehend aufgezeigt.

4.1 Systemarchitektur in verteilter Umgebung

Die in diesem Projekt erarbeitete Systemarchitektur erfordert softwaretechnisch eine umfassende Kommunikationsinfrastruktur. *Peer-to-Peer-Systeme* schieden aufgrund ihrer Topologie von dezentraler Datenhaltung aus Gründen der Konsistenzsicherung aus. Reine *Client-Server-Systeme* sind nicht zweckmäßig, da beispielsweise eine schnelle Visualisierung aufgrund des erforderlichen Kommunikationsaufwands kaum möglich wäre. Unter Erwägung verschiedenster Szenarien bei Berücksichtigung größtmöglicher Flexibilität und gleichzeitiger Konsistenzsicherung der Datenbestände hat sich eine hybride *Client-Server Architektur* als zweckmäßig herausgestellt (siehe Abbildung 4.2). Im vorliegenden Modell erfolgt hierbei eine strenge Unterscheidung zwischen den Instanzen von *Produkt-* und *Wissensdaten*.

Zur Verwaltung der im Rahmen des Planungsprozesses erforderlichen Informationen dient eine gemeinsame serverseitige Datenbasis (*BIM*). Sämtliche Produktdaten werden dort kontinuierlich aktuell vorgehalten und verwaltet. Dadurch wird sichergestellt, dass die Konsequenzen von Planungsänderungen jederzeit für alle Beteiligten ersichtlich sind sowie die Datenintegrität jederzeit sichergestellt ist. Sämtliche Vorgänge der Editierung erfolgen direkt auf dem serverseitigen *BIM*. Lediglich die für die Bearbeitung des Gebäudemodells erforderlichen Geometrieattribute mit Angabe der zu den PDM-Instanzen zugehörigen Nachweisstadien werden temporär in die *lokalen Workspaces* der verteilt angeordneten Projektbeteiligten repliziert und visualisiert. Im Falle von Änderungen müssen somit lediglich sehr geringe Datenmengen zu den Clients übertragen werden.

Im Gegensatz zu den PDM-Instanzen werden die Instanzen der Wissensdaten – die *gewerkespezifischen Wissensbanken* – primär auf den *lokalen Workspaces* der Projektbeteiligten vorgehalten. Hierdurch wird dem Sachverhalt Rechenschaft getragen, dass umfangreiche Wissensinstanzen nicht projekt- sondern vielmehr anwenderspezifisch sind. Ein Fachplaner wird in der Praxis stets bestrebt sein,

umfangreiches und oftmals mit erheblichem Aufwand akquiriertes Erfahrungswissen einerseits für andere Projektbeteiligte nicht zugänglich vorzuhalten (*privater Sektor*), dieses Wissen jedoch andererseits für mehrere Projekte gleichzeitig einzusetzen. Abbildung 4.2 zeigt beispielhaft drei *lokale Workspaces* beteiligter Gewerke. Das System kann jedoch – unter Berücksichtigung der Anpassung der Wissensrepräsentation an die Struktur des *PDM* – beliebig erweitert werden.

Zusätzlich existieren spezielle serverseitige Wissensinstanzen, die nicht durch die einzelnen Fachplaner, sondern durch die *Projektsteuerung* verwaltet werden. Diese Wissensinstanzen werden benötigt, um die Konsequenzen infolge Planungsänderungen im Rahmen einer *Sensitivitätsanalyse* (siehe Kapitel 5) mit Hilfe von Methoden der Fuzzy-Logik zu approximieren.

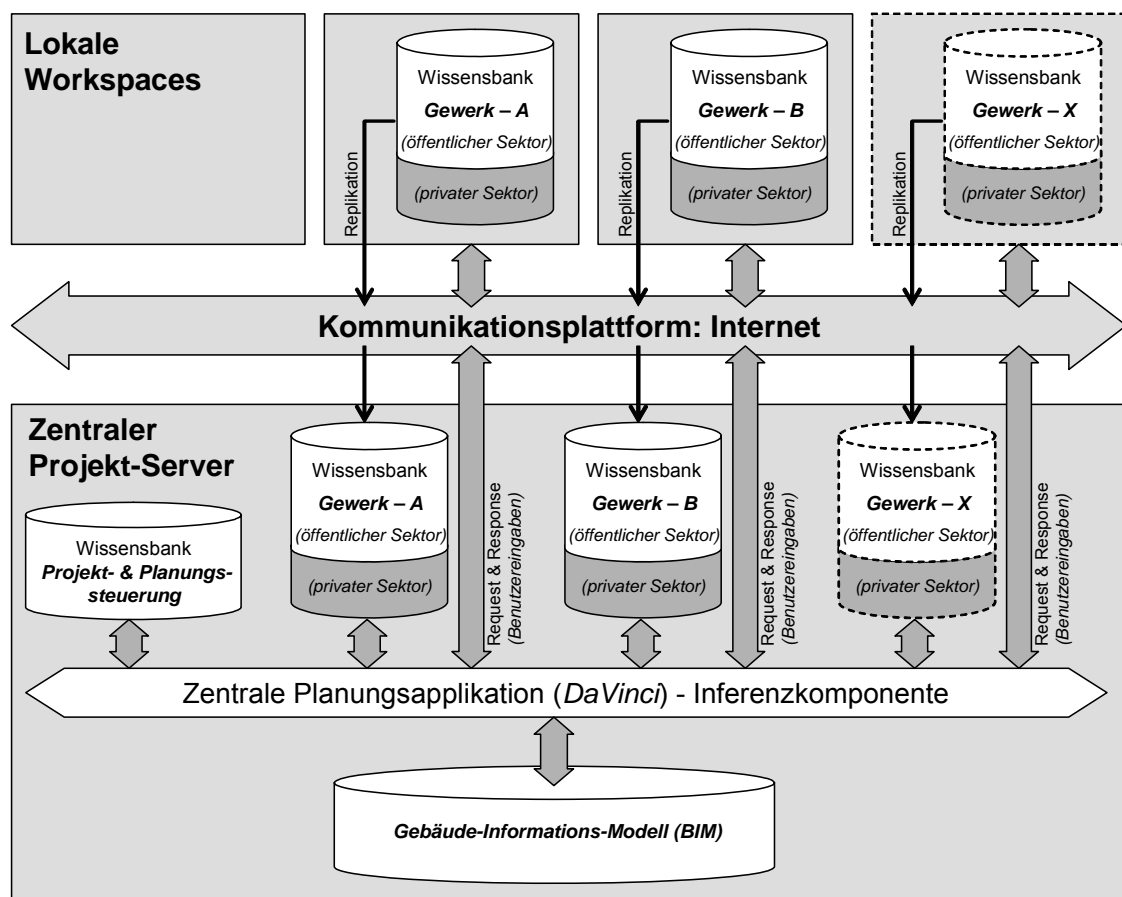


Abbildung 4.2: Systemarchitektur in verteilter Umgebung

Als Kommunikationsplattform dient ein beliebiges Computernetzwerk, vorzugsweise das Internet. Die Evaluierung des Inferenzprozesses mit einer

adäquaten Versuchsumgebung hat gezeigt, dass bei vollständiger Dezentralisierung der Wissensbanken deren Auswertung erhebliche Schwierigkeiten bereitet, sowohl in performanter als auch in organisatorischer Hinsicht. So resultiert aus wiederkehrenden, verschachtelten Anfragen an eine Wissensinstanz ein erheblicher Kommunikationsbedarf. Infolge dessen wurde die Systemarchitektur um einen selektiven Replikationsmechanismus erweitert. Dabei werden Änderungen der lokalen Wissensbanken der Fachplaner bei Verfügbarkeit vor Start eines jeden serverseitigen Inferenzprozesses auf alle betroffenen Projektserver repliziert. Hierdurch wird sichergestellt, dass ein Fachplaner seine lokal vorhandenen Wissensbanken gleichzeitig in mehreren unabhängigen Projekten verwenden kann. Die replizierten Wissensbanken werden mit Hilfe einer zentralen Planungsapplikation folglich ausschließlich durch einen serverseitigen Inferenzprozess auf das zentrale *BIM* angewendet. Aufgrund der dann zentral vorgehaltenen Daten des öffentlichen und des privaten Teils der Wissensbanken stellen die Projektserver somit notwendigerweise eine „vertrauenswürdige Instanz“ innerhalb des Systemverbundes dar.

Werden für die Nachweisführung gesonderte Vorgaben – so genannte Benutzereingaben – vom Fachplaner benötigt (z. B. Vorgabe der Betongüte), so werden diese von der zentralen Planungsapplikation vor Beginn eines Inferenzprozesses direkt beim Anwender angefragt (Request), (siehe Abbildung 4.2). Dieser bearbeitet die Anfrage und sendet nach Bearbeitung der Benutzereingabe das Ergebnis zur Ablage im *BIM* zurück (Response).

4.2 Verteilte Modellbearbeitung

Die grundlegende Funktionsweise des *MORLA-Modells* im Rahmen des Änderungsmanagements verdeutlicht das Sequenzdiagramm (siehe Abbildung 4.3).

Neben der serverseitigen Planungsapplikation werden in den *lokalen Workspaces* der einzelnen Fachplaner (*Clients*) die für Editierungsmaßnahmen, Benutzerinteraktionen etc. erforderlichen Clientversionen der Planungsapplikation vorgehalten. Eine automatisierte Versionierungs- und Updateroutine stellt hierbei sicher, dass immer ausschließlich die aktuellste Clientversion verwendet wird. Als Grundlage befindet sich ein abgestimmtes Bestandsmodell (*BIM*) auf dem zentralen

Projektserver. Eine Modellbearbeitung beginnt mit dem Abruf der BIM-Daten durch den Client am Server (1) - beispielhaft für das Gewerk A dargestellt. Diesem werden via Netzwerk die erforderlichen Daten in seinen *lokalen Workspace* repliziert. Dieser Upload des *BIM* kann von allen weiteren Planungsbeteiligten synchron erfolgen (2). Gemäß der Definition in Kapitel 2.1.1 handelt es sich hierbei um eine parallele Kooperationsform.

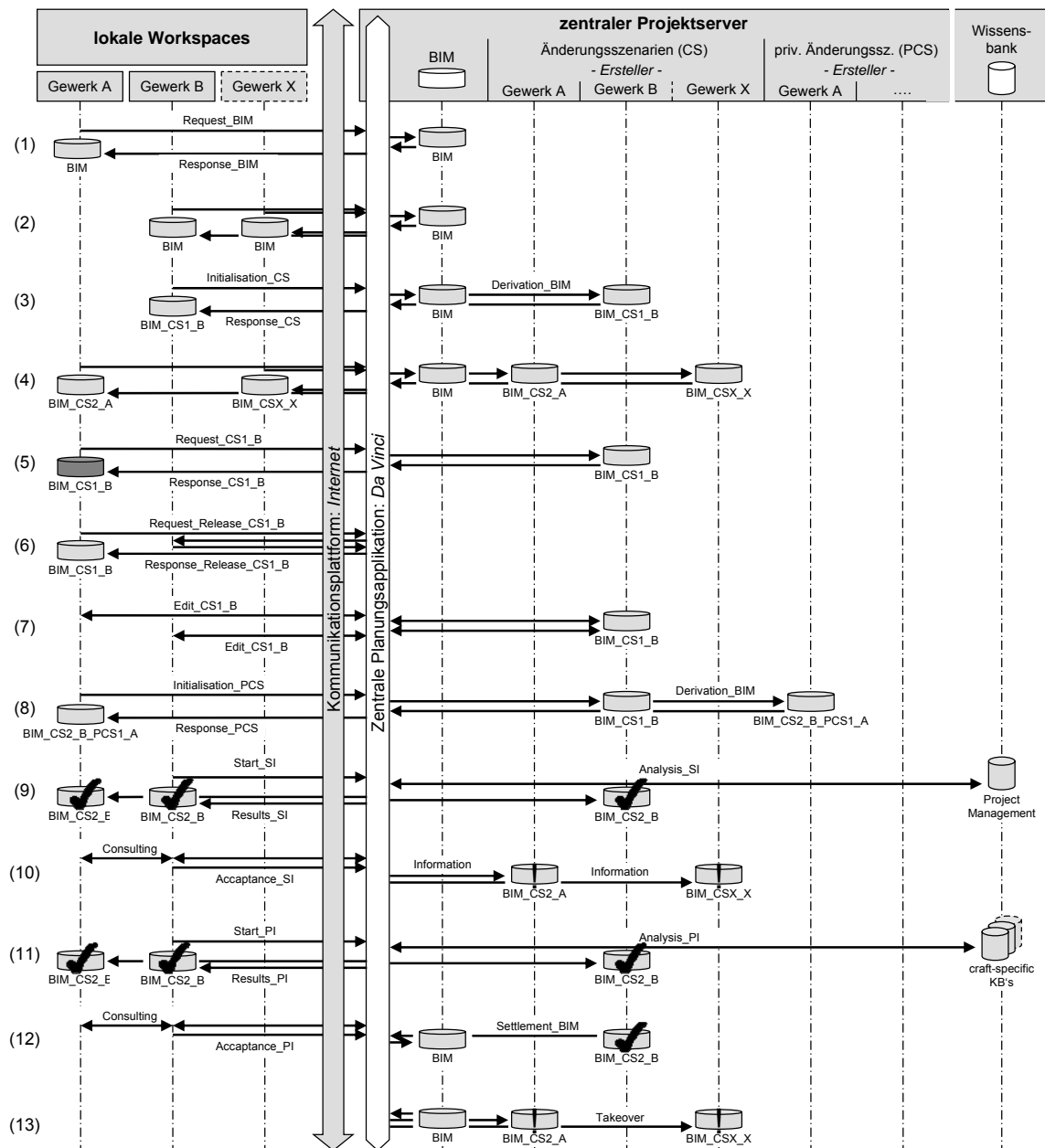


Abbildung 4.3: Sequenzdiagramm der verteilten Modellbearbeitung

Zum Zwecke der Bearbeitung, d.h. Planungsänderungen, können innerhalb des *BIM* so genannte *Änderungsszenarien* (Englisch: *Changing Scenarios* - *CS*) durch Clients erzeugt werden (3). Ein Szenario stellt hierbei eine vollständige Kopie eines Gebäude-Informations-Modells zu einem bestimmten Zeitpunkt dar. An einem Szenario können unterschiedliche Operationen vorgenommen werden, um diese zu einem späteren Zeitpunkt in das Hauptmodell (*BIM*) zu übernehmen oder auch zu verwerfen. Dieses Verfahren ermöglicht neben geschlossenen Bearbeitungseinheiten die Erprobung unsicherer Entwurfskonzepte und Veränderungen sowie die Evaluation von unterschiedlichen Planungsvarianten.

Wie in Abbildung 4.3 beispielhaft gezeigt, wird ausgehend vom Client B, eine Kopie des gesamten abgestimmten Bestandsmodells als Änderungsszenario erzeugt (hier: „Gebäude-Informations-Modell-Szenario 1-Initiator Client B“). Mittels der serverseitigen Planungsapplikation lädt der Client das Szenario in seinen *lokalen Workspace*. Alle weiteren – am Projekt angegliederten – Clients haben zusätzlich die Möglichkeit, synchron weitere neue Änderungsszenarien zu initiieren und einzuladen (4). Hierbei handelt es sich ebenfalls um eine parallele Kooperationsform.

Innerhalb der verteilten Umgebung muss die Einsicht in die verschiedenen Änderungsszenarien – gesteuert von Sperrmechanismen – durch weitere, zunächst vom jeweiligen Szenario noch außenstehende Clients, möglich sein (5). Hierbei handelt es sich jedoch zunächst nur um eine informative Ein- bzw. Ansicht des jeweiligen Änderungsszenarios. Möchte sich nun einer dieser außenstehenden Clients an der Bearbeitung eines Änderungsszenarios beteiligen, so erhält der Initiator des Änderungsszenarios eine Bearbeitungsanfrage (6). Entschließt sich dieser zur Annahme, so kann auch der anfragende Client am Änderungsszenario teilnehmen (hier: Szenario 1 / initiiert von Client B mit Teilnahme von Client A).

Nun kann innerhalb dieses Änderungsszenarios eine gemeinsame synchrone – aber wechselseitige – Bearbeitung (Editierung von Geometriedaten oder von Vorgaben im Rahmen so genannter Benutzereingaben) ohne Start einer jeden Inferenz erfolgen (7). Aus Gründen der Konsistenzhaltung handelt es sich bei der Zugriffsklassifizierung auf die einzelnen PDM-Instanzen um pessimistische Sperrverfahren [SCH00]. Durch das Anlegen privater, vom Änderungsszenario abgeleiteter Änderungsszenarien (Englisch: *Private Changing Scenarios* – *PCS*)

besteht für die Anwender die Möglichkeit einer singulären Evaluierung von Konsequenzen infolge getätigter Modifikationen (8).

Entschließt sich der bearbeitende Client bzw. entschließen sich die bearbeitenden Clients zur Beendigung der Editierungsmaßnahmen innerhalb des Änderungsszenarios, so kann mit der Auswertung der aus diesem Änderungsszenario folgenden Konsequenzen begonnen werden. Zunächst wird hierfür ausgehend vom Initiator des Szenarios eine Sensitivitätsanalyse mit Hilfe der zentralen und allgemein zugänglichen Wissensbank „Projekt- und Planungssteuerung“ angestoßen (9). Diese Sensitivitätsinferenz (SI) kann synchron in weiteren Änderungsszenarien erfolgen. Die auf der Grundlage logischer Fuzzy-Modelle im Rahmen der Sensitivitätsinferenz approximierten Resultate werden zunächst nur den am jeweiligen Änderungsszenario beteiligten Clients (hier: Gewerke A und B) visualisiert (9). Hierdurch werden den Beteiligten die Konsequenzen aus den Planungsmodifikationen aufgezeigt. Entscheiden sich diese Clients unter Zugrundelegung der approximierten Konsequenzen zur Weiterbearbeitung des Änderungsszenarios, so werden daraufhin die evaluierten Auswirkungen betroffener PDM-Instanzen zusätzlich *informativ* an alle weiteren - noch in Bearbeitung befindlichen - Änderungsszenarien mitgeteilt (10). Approximierte Konsequenzen infolge Modifikationen in PCS's werden nur im zugehörigen CS visualisiert. Folglich werden die Bearbeiter aller Änderungsszenarien lediglich über den Umfang sowie die Aussagekraft einer approximierten Parameterveränderung betroffener PDM-Instanzen *informiert*. Es liegt weiterhin im Ermessen der Fachplaner, diese Inferenz-Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in ihren aktuellen Änderungsszenarien zu berücksichtigen.

Entschließen sich der bzw. die Bearbeiter des von der Sensitivitäts-Inferenz ausgewerteten Änderungsszenarios auf der Grundlage der Sensitivitätsergebnisse zur Durchführung einer Neu-Bemessung aller betroffener PDM-Instanzen, so wird eine Nachweis-Inferenz (Englisch: Proof-Inference – PI) unter Verwendung der gewerkespezifischen Wissensbanken in Gang gesetzt (11).

Nach Akzeptanz der Ergebnisse des von der Nachweis-Inferenz ausgewerteten Änderungsszenarios durch alle beteiligten Gewerke (Bedingung: Nachweise wurden alle erfüllt!), werden die geänderten Attribute im Bestandsmodell überschrieben (12). Dieses Modell ist nun das neue, abgestimmte Bestandsmodell (*BIM*). Um weiterhin auf der gleichen Grundlage EINES abgestimmten Bestandsmodells zu

arbeiten, müssen die evaluierten Ergebnisse in den weiteren – in Bearbeitung befindlichen – Änderungsszenarien sowie aller davon abgeleiteten Szenarien übernommen werden (13).

Ab dem Zeitpunkt des Starts der Nachweis-Inferenz können zur Sicherstellung der Konsistenz keine weitere *PI's* in anderen Änderungsszenarien geführt werden. Bis zur Akzeptanz und Überschreibung des *BIM* mit Rückschreibung auf die verbleibenden Änderungsszenarien (bzw. der Ablehnung) der Nachweisergebnisse handelt es sich somit um eine asynchrone, sequentielle Arbeitsabfolge. Hiervon ist jedoch nicht die parallele, wechselseitige Bearbeitung der Szenarios betroffen.

4.3 Produkt-Daten-Modell

Mit Hilfe des Produkt-Daten-Modells werden die innerhalb einer Wissensbank befindlichen Elemente hinsichtlich ihrer Anwendung bei der Sensitivitätsanalyse bzw. der Bemessung strukturiert. Auf der Grundlage der Klassen im PDM wird eine Bauwerksinstanz – das *Gebäude-Informationen-Modell (BIM)* – instanziiert.

Grundlage des eigens hierfür erarbeiteten *PDM* bilden die Produktmodelle des *OFWM* von Albert, sowie des *OWM* von Holéwik. Wie bereits in diesen Arbeiten berücksichtigt, werden zur Vermeidung von sehr großen, unübersichtlichen und somit nur schwer handhabbaren Klassendefinitionen [HOL96] im *MORLA-Modell* sämtliche Informationen, welche üblicherweise innerhalb von Normen und Richtlinien zu finden sind, in einem separaten *Wissens-Daten-Modell* abgebildet. Dies steht im Gegensatz zu den Ansätzen, welche mit Hilfe umfangreicher Attribute und Methoden ein vollständiges Modell abzubilden versuchen [IFC00], [ROE03]. Äquivalent zum Produktmodell des *OFWM* beinhaltet das *PDM* lediglich Methoden, welche innerhalb einer (gewerkespezifischen) Wissensbank als Berechnungselement vom Typ *Produkt-Daten-Modell-Zugriff* verwendet werden. Mit Hilfe von Instanzen dieser Klasse kann infolge der Vordefinition von Methoden leicht auf Werte zurückgegriffen werden, deren Ermittlung auf Basis anderer Berechnungselemente nur sehr aufwendig möglich wäre.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte *PDM* weist im Hinblick auf den Einsatz in einer verteilten heterogenen Planungsumgebung folgende grundlegenden Charakteristika auf:

- Multigewerkefähigkeit:

Das *PDM* muss zur Strukturierung der Berechnungselemente aller am Planungsprozess beteiligten Fachplaner die Klassen der erforderlichen Gewerke vorhalten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde hierfür ein *Produkt-Daten-Modell* erarbeitet, welches beispielhaft die Belange von Bauteilen aus dem Stahlbetonbau berücksichtigt, sowie die Klassen für den Bereich der Raumluftechnik innerhalb des Haustechnikgewerkes erfasst. Zu diesem Zweck wurden neben Klassen für die Domäne *Tragwerksplanung* (Englisch: Structural Design - SD) die erforderlichen Klassen der Domäne *Haustechnik* (Englisch: Heating Ventilation & Air Conditioning – HVAC) im Produkt-Daten-Modell erarbeitet. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Kanalelemente in diversen Ausführungen sowie die zugehörigen Verbindungsprofile (siehe Abbildung 4.4).

Ein besonderer Schwerpunkt wurde hierbei auf Bauteile gelegt, welche Schnittstellen aus der Kollision beider Gewerke, wie beispielsweise Wanddurchbrüche infolge der Durchdringung eines Lüftungskanals durch eine Wand, betreffen.

Des Weiteren wurden raumbezogene Daten [HEC98] im PDM berücksichtigt. Hierfür wurde die Generierung von Räumen als zentrale Gebäudebestandteile ebenso einfach ermöglicht, wie die der benötigten raumluftechnischen Elemente, z. B Ventilatoren, Auslässe und Kanalleitungen.

Sofern die verschiedenen Nachweise nicht auf der Ebene der einzelnen Bauteile geführt werden, können diese in der hierfür erforderlichen Klasse *Bemessungsstelle* vorgehalten werden.

- Mehrbenutzerfähigkeit:

Die Anwendung des *MORLA-Modells* in einer verteilten Planungsumgebung setzt eine verteilte Mehrbenutzerfähigkeit voraus. Im *PDM* wurde zu diesem Zweck die Klasse *Benutzer* unter Berücksichtigung der für eine Mehrbenutzer-Anwendung erforderlichen *Sperrmechanismen* geschaffen. Dem *Ersteller* eines vom

abgestimmten Gebäudemodell abgeleiteten Szenarios wird hiermit die Möglichkeit gegeben, die szenarien-spezifischen Lese- und Editierberechtigungen zu verwalten.

Die Berechtigungen der mit einer eindeutigen Identifikationsnummer (ID) im System berücksichtigten Benutzer werden als Attribute (USERS_ACCESS und USERS_READ) in der Klasse „Szenario“ vorgehalten.

- Planungsstatus:

Im Zuge der Nachweisführung gewerkeübergreifender Elemente im Fall einer Kollision von Bauteilen aus unterschiedlichen Gewerken (z.B.: Wanddurchbruch infolge einer Durchdringung der Wandebene mit einem Lüftungskanal) wird die Berücksichtigung des Planungsstatus der einzelnen Elemente für eine effiziente Nachweisführung erforderlich. Resultierend hieraus wurden die folgenden Planungsstadien für die einzelnen Bauteile als zusätzliche Attribute beispielhaft definiert:

....

Status „3“: Bauteil vordimensioniert (Volumenbildung der Elemente)

Status „4“: Bauteil fertig dimensioniert und bemessen

....

Der Planungsstatus ist um beliebige Zustände (z.B.: *Status „2“: Bauteil architektonisch entworfen*) erweiterbar.

- Planungshistorie:

Die größtenteils iterative Vorgehensweise beim Planungsprozess erfordert die Vorhaltung einer Planungshistorie. Aus einer Bearbeitung von Änderungsanfragen sowie der daraus eventuell resultierenden Folgeanfragen besteht die Gefahr der Bildung von Planungszyklen (Mehrfachbearbeitung gleicher Aufgabenstellungen). Dieser Vorgang kann nur durch einen Benutzereingriff unterbunden werden. Als Entscheidungshilfe steht dem Anwender hierfür die elementbezogene Planungshistorie zur Verfügung. Neben der Element-ID werden hierin folgende Attribute hinterlegt:

- HIST_TYP Typ der Veränderung (neu, editieren, löschen)
- HIST_VAR Variable der Änderung (x, y, z, Name,)
- HIST_OLD vorheriger Wert
- HIST_NEW neuer Wert
- HIST_USER ID des Benutzers, der die Änderung vornimmt
- HIST_TIME Zeitpunkt der Änderung

Infolge der Speicherung dieser szenarienbedingten Verfolgung der Planungshistorie besteht jederzeit die Möglichkeit, jeden beliebigen – zuvor bereits existierenden – Planungsstand zurückzuverfolgen und wiederherzustellen.

Aus den aufgeführten Charakteristika ergibt sich das in Abbildung 4.4 auszugsweise dargestellte UML-Klassendiagramm des *PDM*.

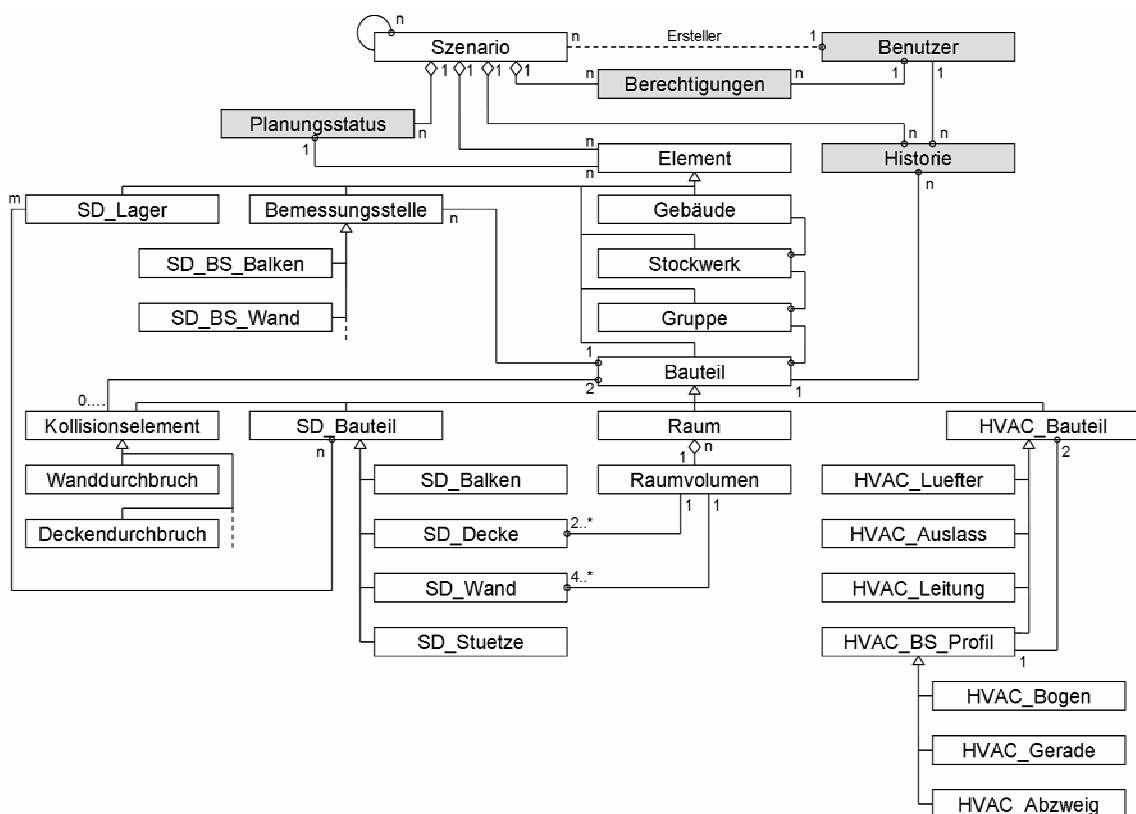


Abbildung 4.4: Auszug aus dem UML-Klassendiagramm des *Produkt-Daten-Modells (PDM)*

In Abbildung 4.4 ist nur beispielhaft die Assoziation zwischen Räumen bzw. deren zugehörigem Volumen zu den erforderlichen horizontalen (SD_Wand) sowie

vertikalen (SD_Decke) Begrenzungen dargestellt. Das *PDM* sieht eine Vielzahl weiterer Relationen zwischen Bauteilen vor.

Mit Hilfe der in Abbildung 4.4 dunkel hinterlegten Klassen werden Prozessinformationen formalisiert. Eine weitere Unterteilung in ein separates Prozessmodell, wie beispielsweise in [BRE98] praktiziert, wird jedoch für nicht erforderlich erachtet. Vielmehr ist das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte *PDM* als übergeordnetes Metamodell aus Produkt- und Prozessmodellierung zu verstehen [FN+04].

4.4 Wissens-Daten-Modell

Die verteilt angeordneten lokalen Wissensbanken der verschiedenen Fachplaner basieren auf einem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten objektorientierten *Wissens-Daten-Modell* (*Knowledge-Data-Model – KDM*). Sie operieren auf dem *Gebäude-Informationen-Modell* (*BIM*), welches aus Instanzen des *PDM* besteht. Die Formalisierung des aus Vorschriften, Regelwerken und Fachliteratur sowie aus Erfahrungen abgeleiteten Wissens erfolgt mit Hilfe sogenannter *Berechnungselemente* (*BE*). Diese *Berechnungselemente* werden innerhalb des *KDM* entsprechend der Methode, mit der sie ihre Werte im Rahmen der Nachweisführung bzw. bei der Sensitivitätsanalyse ermitteln, in verschiedene *BE-Klassen* unterteilt. Das *KDM* repräsentiert die formale Sprache, mit der das Wissen problemgerecht strukturiert und in den erforderlichen Wissensbanken abgebildet wird. Die sinnvolle und transparente Formalisierung des Fachwissens auf der Grundlage der Struktur des *KDM* unter Berücksichtigung der Struktur des *PDM* ist hierbei von entscheidender Bedeutung.

Aufgrund der mannigfaltigen Vorgehensweisen im Rahmen der Nachweisführung ist ein vorgegebener, prozeduraler Ablauf nicht zielführend [ALB92]. Dies bestätigte die Annahme einer grundlegenden, deklarativen Wissensrepräsentation, wie sie auch bereits in [ALB02] angewandt wurde. Beim *MORLA-Modell* handelt es sich aufgrund der Kombination *regelbasierter* und *objektorientierter* Wissensrepräsentationsformen im *KDM* um ein sogenanntes *hybrides* wissensbasiertes System [SCH91].

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte *KDM* basiert auf dem *Wissenselementmodell* und dem *Nachweisparametermodell* des *OWM* von Holéwik [HOL96] sowie dem *Modell der Elemente einer Wissensbasis (MEW)* von Albert [ALB02]. Als Folge einer Analyse hinsichtlich der Anforderungen der Wissensdomänen aller am kooperativen Planungsprozess beteiligten Fachplaner weist das *KDM* folgende besonderen Charakteristika auf:

- PDM-Zugriffe:

Die BE-Klasse *PDM-Zugriff* ermöglicht den Zugriff auf Werte, die im Rahmen einer Auswertung nicht unmittelbar zugänglich sind. Neben dem Zugriff auf Attribut-Werte von PDM-Instanzen (z.B.: Durchmesser d eines RLT-Kanals, Breite b einer Stütze \rightarrow *Basisberechnungselement* – siehe folgend) können auch Verweise auf andere PDM-Instanzen, die durch beliebige Relationen innerhalb des *PDM* assoziiert sind, ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Verweise wird der Zugriff auf von der Inferenz ermittelte BE's innerhalb der „fremden“ PDM-Instanz ermöglicht (z.B.: Zugriff in der Bemessungsstelle für Durchstanzen *design location slab column* auf die erforderliche Längszugbewehrung *erf_A_sI_M* der Bemessungsstellen *slab area* [*slab_X-top* und *slab_Y-top*] \rightarrow *PDM-Zugriff auf gleichberechtigter PDM-Klassenebene*). Mit Hilfe von Instanzen der KDM-Klasse *PDM-Zugriff* kann aber auch infolge vordefinierter Methoden auf Werte zurückgegriffen werden, deren Ermittlung sich auf Basis anderer Berechnungselemente nur sehr aufwändig gestaltet (z.B. Fläche oder Volumen eines Raumes). Die grundlegende Möglichkeit verankerter Methoden von derartigen *abgeleiteten PDM-Zugriffen* wurde bereits auch im *MEW* von Albert vorgesehen. Diese, dem jeweiligen *Produkt-Daten-Modell* angepassten verankerten Methoden, sind jedoch im *KDM* von der Wissensrepräsentationsform unabhängig. Damit ist das *KDM* universell auch auf andere Domänen einsetzbar. Anlage B zeigt die Zusammenstellung der verankerten Methoden der *PDM-Zugriffe* im *MORLA-Modell*.

Neben dem *PDM-Zugriff* gemäß dem Prinzip der Vererbung des objektorientierten Paradigmas auf Parameter des jeweiligen Elementes oder deren übergeordnete Elemente wird im *MORLA-Modell* auch der Zugriff auf weitere Elemente ohne direkte Zugehörigkeit ermöglicht. Beispielsweise erfolgt für den Nachweis eines Lüftungskanalquerschnittes eine sukzessive über das gesamte Kanalnetz rückwärts verkettete Aufsummierung des maßgebenden Parameters *Volumenstrom*. Dies

bedeutet, dass innerhalb des Auswertungsprozesses eines Kanalnetzes jedem Lüftungsquerschnitt der Zugriff auf Parameter vorangegangener PDM-Instanzen ermöglicht werden muss.

Der Zugriff auf die einzelnen Nachweisparameter der differenziert vorliegenden BIM-Elemente wird mit Hilfe von Instanzen der Klasse *Formel* realisiert. Hierfür wurde innerhalb der Klasse *Formel* ein neuer syntaktischer Ausdruck erarbeitet. Um einen exakt spezifizierten Parameter anzusprechen, muss beim Generieren einer Formel zusätzlich die Bezeichnung des betreffenden Gebäudeelementes integriert werden. Diese steht in Form von Berechnungselementen zur Verfügung.

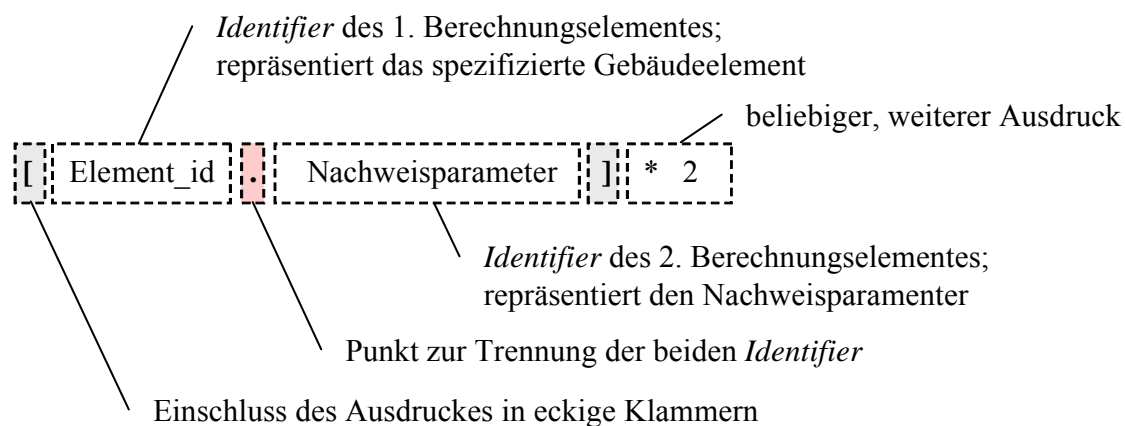


Abbildung 4.5: Syntax der Klasse *Formel* für den erweiterten *PDM-Zugriff* auf gleicher PDM-Klassenebene

Somit ist es nun möglich, während des Inferenzprozesses den strukturellen Aufbau von Netzstrukturen zu analysieren sowie unmittelbar auf die Nachweisparameter des spezifizierten Gebäudeelementes zurückzugreifen.

Instanzen der Klasse *PDM-Zugriff* können numerische Werte, alphanumerische Werte, Wahrheitswerte oder Fuzzy-Mengen als Ergebnis evaluieren.

- Nachweiselektionen:

Mit Hilfe einer Instanz der KDM-Klasse *Nachweiselektion* (siehe Abbildung 4.6a) wird ermittelt, welche Nachweise für eine bestimmte Instanz einer Klasse des Produkt-Daten-Modells *erforderlich* sind und ob diese *erfüllt* sind.

Auf der Basis der Erforderlichkeitsbedingung wird zunächst die Anwendung einer jeden Nachweisselektion auf das zu untersuchende Bauteil evaluiert. Mit Hilfe der Instanz der Klasse *Bedingung* wird für beliebig viele Eingangsvariablen in der Prämisse die Ausgabevariable der Konklusion als *erforderlich (wahr)* oder *nicht erforderlich (falsch)* bestimmt. Im Fall einer fehlenden Erforderlichkeitsbedingung wird ein Nachweis immer für *erforderlich* evaluiert.

Mit Hilfe der Erfülltheitsbedingung wird ebenfalls auf der Basis der Instanz der Klasse *Bedingung* für beliebig viele Eingangsvariablen in der Prämisse die Ausgabevariable der Konklusion zur Überprüfung der Einhaltung der jeweiligen Nachweiskriterien als *erfüllt (wahr)* oder *nicht erfüllt (falsch)* evaluiert.

Für eine effiziente Nachweisführung gewerkeübergreifender Elemente, welche aus der Kollision von Bauteilen aus unterschiedlichen Gewerken resultieren, wird die Berücksichtigung des *Planungsstatus* erforderlich. Aus betrachteten Beispielszenarien resultierte, dass speziell bei diesen Elementen teilweise vom grundsätzlichen deklarativen Nachweisprozess abgewichen werden muss. So wird beispielsweise bei einer Öffnung für einen Lüftungskanal innerhalb einer Stahlbetonwand eine prozessorientierte Vorgabe des Nachweisablaufs erforderlich. Der endgültige statische Nachweis eines Wanddurchbruchs auf der Grundlage einer nur vordimensionierten Lüftungsleitung erscheint weniger sinnvoll als das Führen des Nachweises auf der Grundlage eines fertig dimensionierten und bemessenen Leitungsstranges.

Im MORLA-Modell wurde daher eine Verallgemeinerung der Klasse *Nachweisselektion* durch die Berücksichtigung der *Planungsstatusgrenze* vorgenommen. Für das betrachtete Beispiel muss für den Nachweis einer ausreichenden Breite des Wanddurchbruchs infolge der Leitungsdurchdringung zunächst die Bedingung eines *Mindestplanungsstatus* (*Status „4“: Bauteil fertig dimensioniert und bemessen*) des Lüftungskanals erfüllt werden. Die alleinige Definition einer Nachweisselektion

Erforderlichkeitsbedingung: $[\text{Rohr.Planungsstatus}] \geq 4 \text{ AND } [\text{Planungsstatus}] \geq 3$
Erfülltheitsbedingung: $[\text{Rohr.Durchmesser}] < b_{\text{WD}} - (2 * a_{\text{min}})$
Planungsstatusgrenze: 3

mit: b_WD: Breite des Wanddurchbruchs
 a_min: Mindestabstand RLT-Leitung zur Durchbruchkante
 (Definition des Planungsstatus gemäß zuvor)

ist hierbei nicht zielführend, da die Nachweisselektion im Rahmen der Inferenz im betrachteten Beispiel bei Planungsstatus $< „3“$ des Rohres als *nicht erforderlich* ausgewertet wird. Da der Nachweis jedoch für die Wand grundsätzlich zu führen ist, muss eine zusätzliche Nachweisselektion mit der Überprüfung der Erfüllung des Nachweisstatus vorangeschaltet werden:

Erforderlichkeitsbedingung: [Planungsstatus] ≥ 3

Erfülltheitsbedingung: [Rohr.Planungsstatus] ≥ 4

Planungsstatusgrenze: 3

Hierdurch wird bei nicht positiv nachgewiesenem Lüftungsquerschnitt der Nachweis der Öffnungsbreite in der Wand als *nicht erfüllt* evaluiert. Grundlage für die Anwendung beider Nachweise im dargestellten Beispiel ist die Erforderlichkeit eines *Mindestplanungsstatus* des Wanddurchbruchs von „3“ (vordimensioniert).

Wird die im Nachweis definierte Erfülltheitsbedingung mit *falsch* ausgewertet, so wird dem Nachweis eine *Planungsstatusgrenze* unterhalb des betrachteten Planungsstatus zugewiesen. Infolge der Auswertung der Erfülltheitsbedingung mit *wahr* wird der Planungsstatus durch die betrachtete Nachweisselektion nicht begrenzt. Hierdurch bleibt eine nach oben hin offene Definition von Planungsstadien gewährleistet.

- Sensitivitätsselektionen:

Mit Hilfe einer Instanz der KDM-Klasse *Sensitivitätsselektion* (siehe Abbildung 4.6b) wird der Grad der Veränderung von Parametern infolge Planungsmodifikationen auf der Grundlage von Methoden der Fuzzy-Logik approximiert.

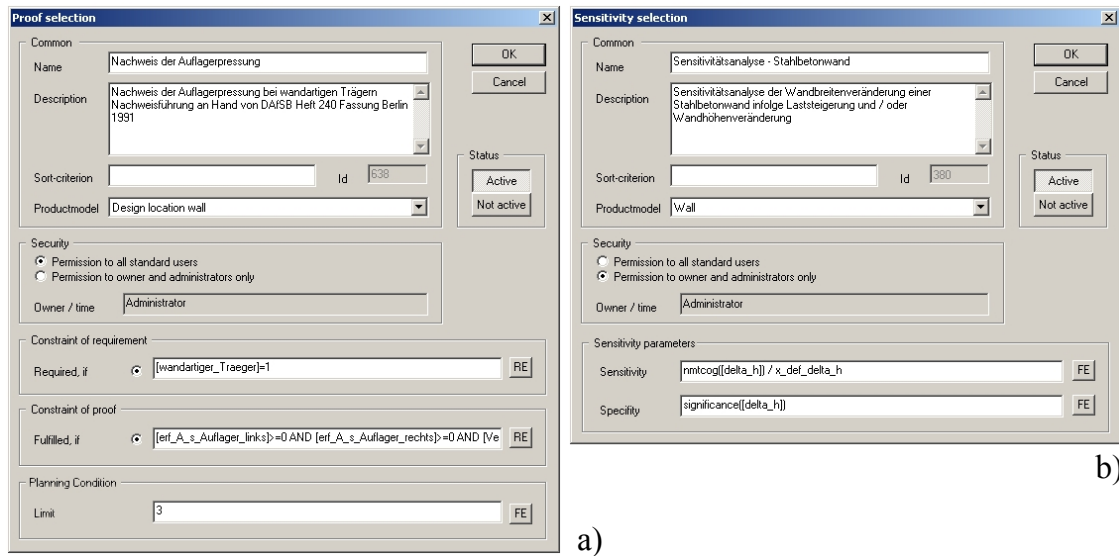


Abbildung 4.6: Dialoge für Berechnungselemente der Klassen:

- a) Nachweisselektion
- b) Sensitivitätsselektion

Sofern eine PDM-Instanz von einer Planungsänderung als *betroffen* ermittelt wird – und somit darin abgelegte BE-Instanzen den Nachweisstatus *unsicher* aufweisen – erfolgt die Anwendung der in gleicher PDM-Ebene befindlichen *Sensitivitätsselektion* im Rahmen der *Sensitivitätsanalyse*. Mit Hilfe der Instanz der Klasse *Formel* wird zum einen der Wert der Parameterveränderung bestimmt, mit dessen Hilfe die farbliche Definition des Grades von Konsequenzen in der graphischen Darstellung erfolgt. Zum anderen wird ebenfalls auf der Basis der Klasse *Formel* die *Spezifität* der Fuzzy-Ergebnismenge zur Bestimmung der Transparenz (als Darstellungsform der Aussagekraft der Parameterveränderung) für die spätere graphische Darstellung ermittelt.

- Fuzzy-Modelle:

Für die Modellierung von Expertenwissen im Rahmen der Approximation von Konsequenzen infolge Planungsmodifikationen wird im *KDM* die Klasse *Fuzzy-Modell* verwendet. Während Albert [ALB02] im *MEW* die hieraus abgeleiteten Klassen *funktionales MA-Modell* und *funktionales TSK-Modell* für Dimensionierungsaufgaben und Tragsystementscheidungen anwendet, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit die KDM-Klasse *logische Fuzzy-Modelle* für die Sensitivitätsanalyse erarbeitet.

Zusätzlich wurde die Anwendung zur Bestimmung der *Spezifität* von Fuzzy-Ergebnismengen in der Klasse *logische Fuzzy-Modelle* berücksichtigt.

Als Eingangswerte werden entsprechend der Vorgehensweise *logischer Fuzzy-Modelle* scharfe Werte (*Singletons*) zugrunde gelegt. Dies gründet auf der Tatsache, dass die Verwendung unscharfer Eingangswerte mit deren steigender Unschärfe zu größeren Einschränkungen der möglichen Ergebnisse führen würde, was dem gewünschten Systemverhalten völlig entgegensteht. Das Ergebnis einer Instanz der Klasse *logische Fuzzy-Modelle* ist stets eine Fuzzy-Menge. Für die Ermittlung eines defuzzifizierten Wertes wird eine Instanz der Klasse *Formel* benötigt.

- Fremdzugriffe:

Infolge der verteilten Planungsumgebung muss auch im Rahmen einer Inferenz der Zugriff auf Werte von Berechnungselementen ermöglicht werden, die in der gewerkespezifischen MORLA-Wissensbank anderer Planungsbeteiligter abgelegt sind. Für die Verwaltung dieser Zugriffe werden im *MORLA-Modell* Berechnungselemente der Klasse *Fremdzugriff* vorgehalten.

Unter Berücksichtigung der spezifischen Erfordernisse der vorliegenden Arbeit wurde das *KDM* erarbeitet, dessen UML-Klassendiagramm (Auszug) in Abbildung 4.7 dargestellt ist.

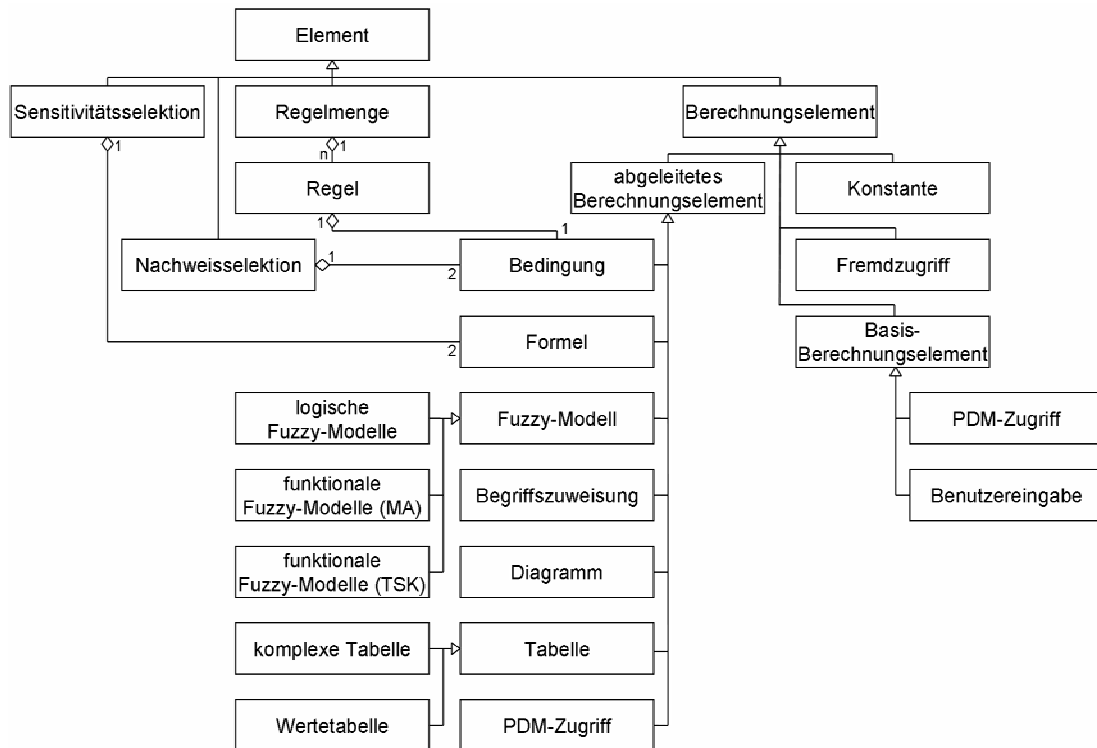


Abbildung 4.7: Auszug aus dem UML-Klassendiagramm des *Wissens-Daten-Modells (KDM)*

Das UML-Klassendiagramm in Abbildung 4.7 zeigt u. a. auch Klassen von Berechnungselementen, die sowohl aus dem *MEW* von Albert [ALB02], als auch aus dem *Nachweisparametermodell* von Holéwik [HOL96] abgeleitetet wurden. Diese werden im Folgenden mit Hilfe eines Ablaufdiagramms in Abbildung 4.8 erläutert.

Als Ergebnis einer Instanz der Klasse *Regelmenge* wird an das aufrufende Element einer gewerkespezifischen Wissensbank ein Verweis auf ein anderes Element der gleichen bzw. einer anderen Wissensbank, welches die Bedingung erfüllt, gegeben. Stehen im Rahmen des Inferenzprozesses mehrere Instanzen zur Ermittlung eines Wertes zur Verfügung, so wird also innerhalb einer Wissensbank mittels einer *Regelmenge* festgelegt, welche der Instanzen im betrachteten Fall verwendet werden soll.

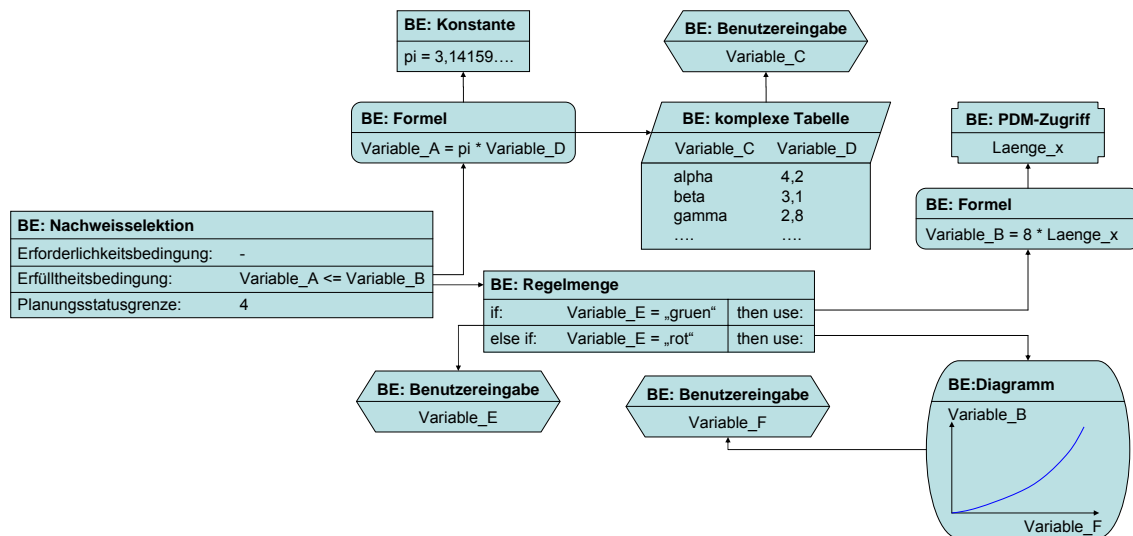


Abbildung 4.8: Ablaufdiagramm einer beispielhaften Nachweiseselektion

Mit Hilfe der BE-Klasse *Benutzereingabe* hat der Anwender die Möglichkeit, vor dem Start einer jeden Inferenz erforderliche Eigenschaften von PDM-Instanzen (z.B. *Nutzungsart* in einem Raum) vorzugeben. Im Fall eines fehlgeschlagenen Nachweises werden diese Berechnungselemente als Änderungsmöglichkeit zur Erfüllung des Nachweises im Rahmen der Erklärungskomponente dem Anwender aufgezeigt. Der bei der Definition einer Instanz der Klasse *Benutzereingabe* festzulegende Variablentyp kann numerische Werte, alphanumerische Werte, Wahrheitswerte oder Fuzzy-Größen repräsentieren. Durch die Verwendung von Instanzen der Klasse *Formel* wird für beliebig viele numerische Eingangswerte ein numerischer Ergebniswert evaluiert. Zusätzlich wird im *MORLA-Modell* mit Hilfe dieser BE-Klasse die im Rahmen dieser Arbeit an *logische Fuzzy-Modelle* angepasste *Defuzzifikation* sowie die *Spezifität* von Fuzzy-Ergebnismengen ermöglicht. Die in Normen und Richtlinien in Tabellenform hinterlegten Informationen werden mit der Klasse *Tabelle* und der von ihr abgeleiteten Klassen *Wertetabelle* und *komplexe Tabelle* repräsentiert. Mit Hilfe von Instanzen der Klasse *Wertetabelle* wird für zwei vorgegebene Eingangswerte (numerisch oder alphanumerisch) ein Ausgabewert (numerisch) zurück geliefert. Instanzen der Klasse *komplexe Tabelle* liefern für einen Eingangswert (numerisch oder alphanumerisch) beliebig viele Ausgabewerte (numerisch oder alphanumerisch) zurück. Sofern Eingabe- und Ausgabewerte numerisch sind, besteht die Möglichkeit der Interpolation von Zwischenwerten. Mittels Instanzen der Klasse *Diagramm* können numerische Werte aus Höhenliniendiagrammen evaluiert werden. Die

Definition der Funktionsverläufe erfolgt im Rahmen der Wissenserwerbskomponente graphisch mit der Möglichkeit der Zugrundelegung einer Vorlagenpause. Instanzen der Klasse *Begriffszuweisungen* dienen zur Formalisierung natürlichsprachlicher Begriffe. Die alphanumerischen Rückgabewerte werden hierbei durch direktes Auslesen ermittelt.

Im *KDM* wird eine Unterteilung in *Basisberechnungselemente* und *abgeleitete Berechnungselemente* vorgenommen. Während für die Ermittlung der Werte *abgeleiteter Berechnungselemente* andere Berechnungselemente erforderlich sind, benötigen *Basisberechnungselemente* keinerlei fremde Berechnungselemente für ihre Auswertung. Instanzen der Klasse *Konstante* repräsentieren fest definierte Werte, die vom Anwender nicht editiert werden können. Daher gehört diese Klasse weder zu den *Basisberechnungselementen*, noch zu den *abgeleiteten Berechnungselementen*.

Aufbau und Inhalt gewerkespezifischer Wissensbanken

Die Wissensbank stellt das zentrale Element eines wissensbasierten Systems dar. Die sinnvolle und transparente Formalisierung des Fachwissens auf der Grundlage der Struktur des *Wissens-Daten-Modells* unter Berücksichtigung der Struktur des *Produkt-Daten-Modells* ist hierbei von entscheidender Bedeutung.

Der Inhalt der Wissensbanken untergliedert sich grundlegend in zwei Teilbereiche (siehe Abbildung 4.9).

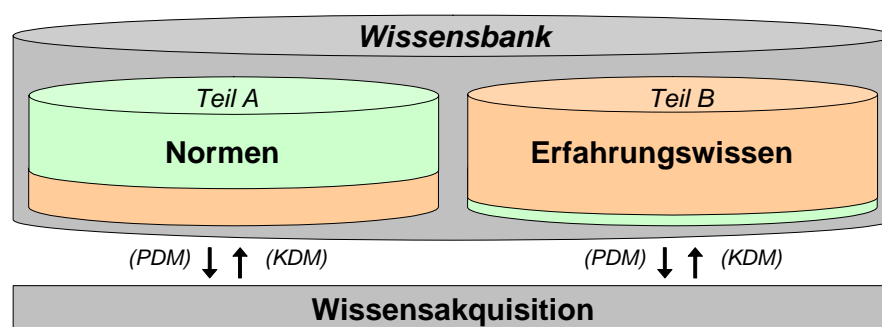


Abbildung 4.9: Aufbau einer gewerkespezifischen Wissensbank

Zur Repräsentation von Normwissen werden die gewerkespezifischen und richtlinienbezogenen Nachweise vorgehalten. Ebenso besteht die Möglichkeit, unscharfes und auf Erfahrung basierendes Expertenwissen zu formalisieren. Hierbei

kann es sich beispielsweise um die für die Sensitivitätsanalyse erforderlichen Berechnungselemente handeln. Mit Hilfe einer Wissenserwerbskomponente können unter Verwendung und Berücksichtigung der definierten Klassenschemen des *PDM* und des *KDM* durch einen Experten neue Berechnungselemente in der Wissensbank, welche die Informationen einer Wissensdomäne beinhaltet, strukturiert und abgelegt werden.

Grundlage für die Anwendung eines solchen wissensbasierten Systems in der Praxis ist der Schutz sensibler Daten vor dem Zugriff „Außenstehender“. „Außenstehende“ beschreibt hierbei diejenigen Planungsbeteiligten, welche das betrachtete Berechnungselement nicht formalisiert haben. Daher wurde für alle Berechnungselemente die Möglichkeit der Gruppierung in einen öffentlich-zugänglichen bzw. in einen privat-gesperrten Bereich geschaffen. Durch die auf das Ergebnis reduzierte Visualisierung der Auswertung geschützter Berechnungselemente innerhalb der Erklärungskomponente ist der Rechenweg für „Außenstehende“ nicht mehr ersichtlich. Das für die Auswertung erforderliche und formalisierte Expertenwissen steht somit zur Verfügung, bleibt aber vor der Einsichtnahme und Antizipation durch weitere Planungsbeteiligte geschützt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden für die Überprüfung der entwickelten Ansätze gewerkespezifische Wissensbanken zur Nachweisführung und Bemessung für die Gewerke der *Tragwerksplanung* (Bereich *Stahlbetonbau*) und *Haustechnik* (Bereich *Raumlufttechnik* – siehe Anlage C) sowie eine zentral vorliegende und öffentlich einsehbare Wissensbank für die Sensitivitätsanalyse infolge Planungsänderungen erarbeitet.

4.5 Inferenzprozess

Die Inferenzkomponente beinhaltet den Problemlösungsalgorithmus, der unter Verwendung der Informationen in der Wissensbank sowie der zugrunde liegenden Daten der Problemstellung die Lösung evaluiert [SCH91]. Wird eine *MORLA-Wissensbank* auf ein *Gebäude-Informationen-Modell* angewendet, so werden zunächst mit Hilfe von Erforderlichkeitsbedingungen sämtliche in den einzelnen Bauteilen als *erforderlich* evaluierten Nachweise identifiziert und dem Benutzer kenntlich gemacht. Dem Anwender steht dann die Möglichkeit zur Verfügung,

einzelne identifizierte Nachweise sukzessive zu selektieren oder diese in Ihrer Gesamtheit auszuwählen und auf ihre Erfüllung hin zu überprüfen. Beim Ausführen der Nachweise wird ausgehend von den für die Bedingungen benötigten Berechnungselementen eine *rückwärtsgerichtete Inferenz* bzw. *Rückwärtsverkettung* gestartet. Der Rückwärtsverkettung liegt dabei das Prinzip der transitiven Verknüpfung einzelner BE's zugrunde. Hierbei geht man nicht – wie bei einer Vorwärtsverkettung – von gegebenen Daten aus, sondern von einem Zielobjekt (Berechnungselement), über dessen Zustand der Benutzer Informationen (Auswertung) wünscht [BKI03].

Anhand der Ermittlung der Erfüllung eines erforderlichen Nachweises soll die Funktionsweise des Inferenzmechanismus mit Hilfe der Abbildung 4.10 verdeutlicht werden.

Im dargestellten Fall muss die Strömungsgeschwindigkeit v_L eines Lüftungskanals um die Bedingung zu erfüllen kleiner als die zulässige Strömungsgeschwindigkeit $v_{L,zul}$ sein. Da die Werte der Berechnungselemente $v_{L,zul}$ und v_L zunächst unbekannt sind, werden diese auf die Agenda der auszuwertenden Berechnungselemente gesetzt und eine Suche nach Instanzen begonnen, die zunächst den Wert von $v_{L,zul}$ ermitteln können. In der Wissensbank des Gewerkes Haustechnik befindet sich ein Berechnungselement der Klasse *Benutzereingabe*, welches den vor der Inferenz definierten Wert von 4,0 m/s zurückliefert. Das Berechnungselement $v_{L,zul}$ wird nach seiner Auswertung von der Agenda gestrichen und der ermittelte Wert in der BIM-Datenbank abgelegt. Des Weiteren befindet sich in der Wissensbank eine Formel zur Ermittlung des Wertes von v_L , nämlich das Produkt aus der Luftwechselrate LW_N , mit dem Quotienten aus Raumvolumen V_R und der Querschnittsfläche des betrachteten Lüftungskanalquerschnittes A_L . Die unbekannten Werte LW_N , V_R und A_L werden ebenfalls auf der Agenda vermerkt. Zur Ermittlung der erforderlichen Luftwechselrate LW_N steht in der Haustechnik-Wissensbank eine Instanz der Klasse *komplexe Tabelle* zur Verfügung. Diese benötigt als weiteren Eingangswert den Wert eines Berechnungselementes *Nutzungsart*, welches als Instanz der Klasse *Benutzereingabe* vorliegt und zur Auswertung von $LW_N = 10$ [1/h] herangezogen wird. Zur Ermittlung des Wertes V_R (*Raumvolumen*) befindet sich in der Wissensbank eine – mittels der Klasse *Formel* definierte – verankerte Methode eines *PDM-Zugriffs* zur Volumenermittlung eines spezifizierten Raums (in BIM-Datenbank gespeichert).

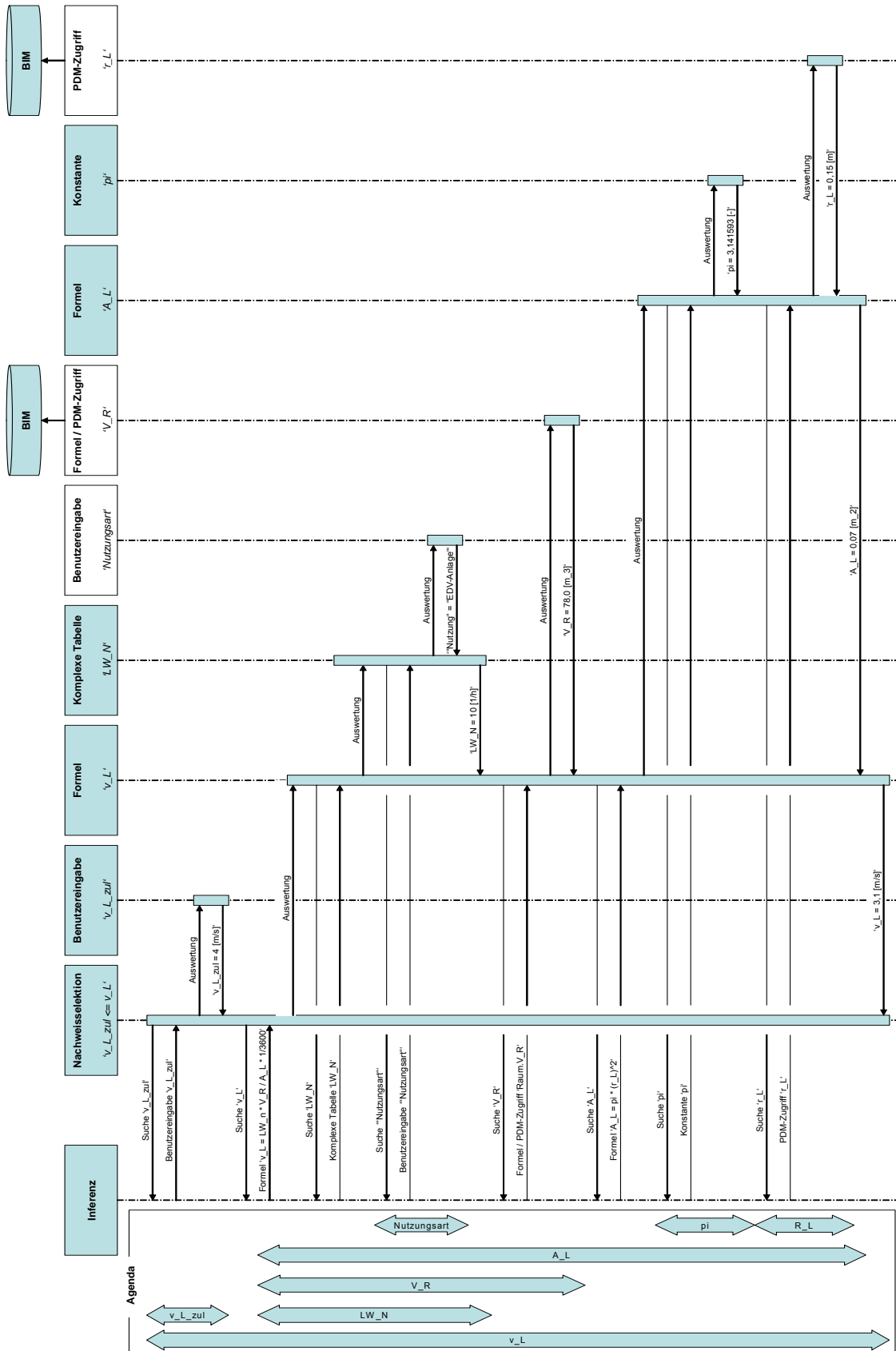


Abbildung 4.10: Sequenzdiagramm der Auswertung einer Erfülltheitsbedingung

Der Wert der Querschnittsfläche A_L des betrachteten Lüftungskanals kann mit Hilfe einer Instanz der Klasse Formel ermittelt werden. Diese verwendet die unbekannten Berechnungselemente *Kreiszahl* π (Instanz der Klasse *Konstante* „pi“) und *Lüftungskanalradius* r_L (Instanz der Klasse *PDM-Zugriff* „r_L“) als Basisberechnungselemente. Somit sind sämtliche Werte der für die Auswertung der Erfülltheitsbedingung erforderlichen Berechnungselemente bekannt und können von der Agenda ebenfalls gestrichen werden. Die Bedingung kann unmittelbar ausgewertet werden:

$$v_{L,zul} = 4,0 \text{ [m/s]} \geq v_L = 10 \text{ [1/h]} \cdot 78,0 \text{ [m}^3\text{]} / (\pi \cdot 0,15 \text{ [m]}^2) \cdot 1/3600 \text{ [h/s]} = 3,1 \text{ [m/s]}$$

→ Erfülltheitsbedingung: *erfüllt*

Allgemein lässt sich der Inferenzmechanismus in folgender Weise zusammenfassen (siehe Abbildung 4.11):

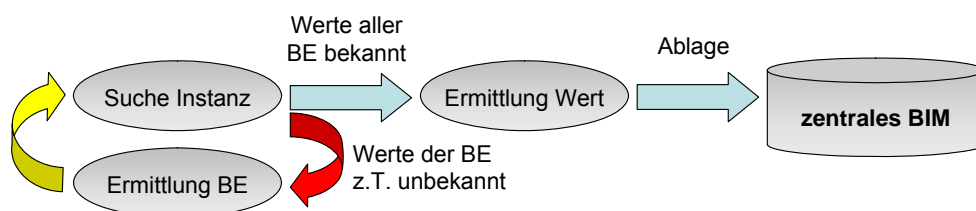


Abbildung 4.11: Grundlegende Funktionsweise des Inferenzprozesses

Sind die Werte der innerhalb der Erfülltheitsbedingung verwendeten Berechnungselemente bekannt, so können diese unmittelbar ausgewertet und als erfüllt oder nicht erfüllt bewertet werden. Ist der Wert eines bestimmten Berechnungselementes unbekannt, so wird eine Suche nach einer in den verschiedenen Wissensbanken vorhandenen Instanz zu dessen Ermittlung in Gang gesetzt. Die Suche beginnt auf derjenigen Ebene des *PDM*, auf der die zu ermittelnde Instanz abgelegt wurde. Hierbei wird auf Berechnungselemente innerhalb der betrachteten *PDM*-Instanz sowie den nächst höheren Ebenen des *PDM* gemäß dem Prinzip der Vererbung des objektorientierten Paradigmas zugegriffen. Mit Hilfe des erweiterten *PDM-Zugriffs* ist es auch möglich, auf *PDM*-Instanzen ohne direkte Zugehörigkeit zu verweisen. Wird eine solche Instanz gefunden und sind alle Werte zur Ermittlung ihres Werts vorhanden, so wird der Wert von der gefundenen Instanz ermittelt und an die aufrufende Instanz zurückgegeben und in der BIM-Datenbank abgelegt. Der beschriebene Prozess gleicht grundsätzlich einem

Backtracking Algorithmus (Ausnahme: Selektion der Lösungswege durch KDM-Klasse *Regelmenge* → Eliminierung nicht gültiger Lösungspfade), ähnlich einem Simple bzw. Delta Star Algorithmus [GRS03].

Die Erklärungs- und Dialogkomponenten bilden die Schnittstellen zum Anwender bzw. Experten. Mit Hilfe der Dialogkomponente besteht für den Anwender die Möglichkeit zur Editierung der Werte von Berechnungselementen im Fall einer fehlgeschlagenen Erfülltheitsbedingung. Hierfür stehen Instanzen der Klasse *Basisberechnungselemente* (in Abbildung 4.10 weiß hinterlegt) zur Verfügung. Dabei kann es sich beispielsweise um Geometriewerte (Verwendung im Rahmen der Inferenz durch *PDM-Zugriff* – z.B. Verbreiterung eines Bemessungsquerschnittes) oder Eigenschaftswerte (Verwendung im Rahmen der Inferenz durch *Benutzereingabe* – z.B. Erhöhung einer bestimmten Materialgüte) handeln. Werden Werte von Basisberechnungselementen verändert, so muss zur Sicherstellung der Konsistenz diese Veränderung den hiervon abhängigen BE's „mitgeteilt“ werden. Hierfür wurde in der vorliegenden Arbeit ein Konzept für ein intelligentes Änderungsmanagement realisiert, welches die Abhängigkeiten der verschiedenen Berechnungselemente im Rahmen des Inferenzmechanismus rückverfolgt. Hierbei entstehen mehrschichtige Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Berechnungselementen, welche durch den Einsatz von *dependency networks* und *influence networks* repräsentiert werden [MMC02].

Beim *Abhängigkeitsmodell* werden hierfür zu einem Berechnungselement diejenigen Berechnungselemente in einer *Abhängigkeitsliste* gespeichert, welche verwendet wurden, um seinen Wert zu ermitteln. Das übergeordnete Element „kennt“ somit die Elemente, aus welchen es seinen eigenen Wert ermittelt. Beim *Einflussmodell* werden zu einem Berechnungselement diejenigen Berechnungselemente gespeichert, welche das betrachtete BE verwendet haben, um deren Wert zu ermitteln (siehe Abbildung 4.12).

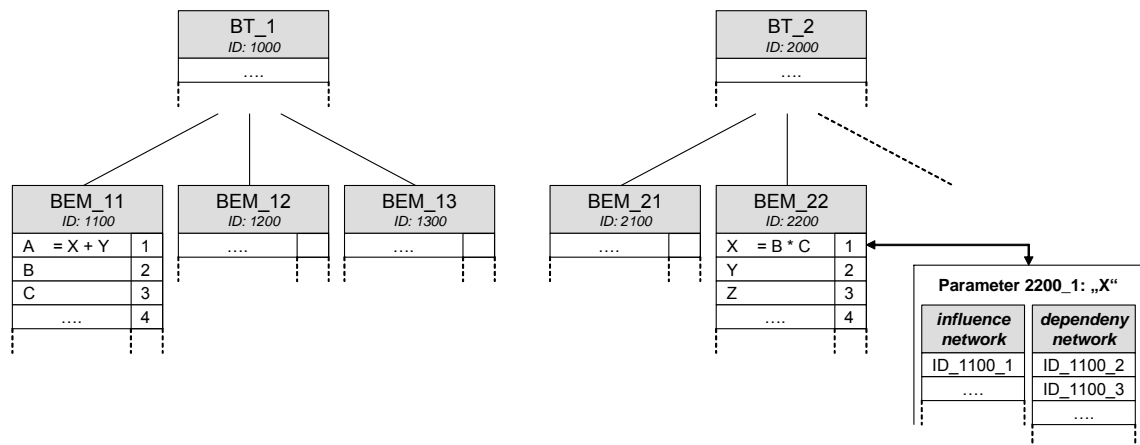


Abbildung 4.12: Abhängigkeits- und Einflussnetz

Sobald ein oder mehrere Werte von Berechnungselementen $B_{1,...,n}$ verändert werden, wird der Nachweisstatus für alle Berechnungselemente $E_{1,...,m}$ in der *Einflussliste* von $B_{1,...,n}$ auf *unsicher* gesetzt. Das führt dazu, dass der Status aller nachfolgenden Berechnungselemente $F_{1,...,p}$ von $E_{1,...,m}$ ebenfalls auf *unsicher* gesetzt wird. Der Status *unsicher* bedeutet hierbei, dass sich der Wert eines direkt oder indirekt untergeordneten Berechnungselementes geändert hat und das betrachtete BE *möglicherweise ungültig* (\rightarrow *unsicher*) wurde. Somit setzt sich der Status eines jeden Berechnungselementes aus den Stadien der von ihm verwendeten Elemente zusammen. Ein Berechnungselement kann nur dann den Status *gültig* (bzw. *erfüllt*) annehmen, wenn alle seine „Unter-Berechnungselemente“ ebenfalls den Status *gültig* aufweisen. Wird ein Berechnungselement mit dem Status *unsicher* im Rahmen der Inferenz angetroffen, so muss dessen Wert mit Hilfe des beschriebenen Algorithmus neu ermittelt werden. Dieser Prozess wird solange rekursiv wiederholt, bis die betrachtete Nachweiselektion ausgewertet ist. Hierdurch wird sichergestellt, dass nur Nachweise, welche *unsichere* bzw. *ungültige* Werte verwenden und daher potenziell selbst *ungültig* sind, neu geführt werden müssen. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass keine Nachweise mit ungültigen Werten geführt werden und bei Änderung der Werte von Berechnungselementen nur die tatsächlich erforderlichen Berechnungen neu durchgeführt werden müssen.

Da die einzelnen Instanzen der verschiedenen Berechnungselemente auf den zugehörigen PDM-Ebenen abgelegt werden und somit eine Verknüpfung zum *BIM* bilden, kann der Registrierungsmechanismus, welcher die Abhängigkeiten zwischen den BE's erfasst, nicht generisch – etwa bei der Erstellung einer Wissensbank –

erfolgen, sondern erst zu dem Zeitpunkt, in dem die Inferenzmaschine auf ein konkretes *BIM* angewendet wird.

Der beschriebene Prozess zur Ermittlung des Nachweisstatus erfolgt äquivalent auch für die PDM-Instanzen. Sobald ein Wert der Instanz eines Berechnungselementes, welches in einer PDM-Instanz (\triangleq Bauteil) abgelegt ist, den Nachweisstatus *unsicher* annimmt, wird das komplette Bauteil dem Anwender ebenfalls mit dem Nachweisstatus *unsicher* kenntlich gemacht.

Der direkte Zugriff auf die interne Datenstruktur wird im Rahmen des Inferenzprozesses unterbunden (\rightarrow Kapselung). Dieser wird nur durch Schnittstellenfunktionen, die gleichzeitig den Zugriff im Abhängigkeits- und Einflussnetz protokollieren, realisiert.

Durch die Abbildung der Abhängigkeiten wird die lückenlose Identifikation der Konsequenzen von Planungsänderungen ermöglicht. Dieser Mechanismus zur Verwaltung von Änderungen bildet die Grundlage der zwingend erforderlichen Konsistenzsicherung. *Konsistenz* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass alle Berechnungselemente ihre Werte mit den aktuellen Werten ermittelt haben und daher mathematisch korrekt sind.

Im Zuge der Anwendung des Inferenzmechanismus in einer verteilten Planungsumgebung mit mehreren Projektbeteiligten muss der Inferenzmechanismus zusätzliche Anforderungen erfüllen:

- Die in den gewerkespezifischen Wissensbanken enthaltenen Nachweise können im *MORLA-Modell* nur von den zugehörigen Fachplanern „angestoßen“ werden. Da größtenteils mehrere Gewerke von einer Änderung (mit evtl. Folgeanfragen) betroffen sind, müssen mehrere Inferenzprozesse durchlaufen werden. Hieraus kann resultieren, dass auch noch nicht integrierte Fachplaner zur Bearbeitung der aus ihrem Gewerk betroffenen Elemente am betrachteten Änderungsszenario teilnehmen müssen. Zur Gewährleistung, dass alle Nachweise mit aktuellen Werten geführt werden – und somit zur Sicherstellung der Konsistenz – können Inferenzen innerhalb eines Änderungsszenarios nur sequentiell erfolgen.

- Im Zuge der Inferenz wird der für die Nachweisführung gewerkeübergreifender Bauteile (z.B. Wanddurchbruch) erforderliche gewerkebezogene *Planungsstatus* eines jeden Bauteils ermittelt. Hierfür wird das Minimum der *Planungsstatusbegrenzungen* aller in einem Bauteil enthaltenen Nachweisselektionen ermittelt. Weisen alle beinhalteten Berechnungselemente – und somit auch die Nachweisselektionen – den Nachweisstatus *gültig* bzw. *erfüllt* auf, so erfolgt keine Begrenzung des in den Nachweisselektionen definierten Planungsstatus. Es gilt dann der im Modell vorgegebene höchstmögliche *Planungsstatus*. Dies zeigt den Unterschied - aber auch die Abhängigkeit - zwischen *Nachweisstatus* und *Planungsstatus* der KDM- bzw. PDM-Instanzen auf.
- Auch bei der Anwendung beliebiger gewerkespezifischer *MORLA-Wissensbanken* auf das *BIM* muss die korrekte Identifikation von Berechnungselementen gewährleistet sein. Da BE's über ihren Namen identifiziert werden, kann der Fall eintreten, dass in zwei unterschiedlichen Wissensbanken BE's mit identischem Namen enthalten sind. Beispielsweise kann das Berechnungselement „d“ in der Wissensbank der Haustechnik den Durchmesser eines Lüftungskanalquerschnittes definieren, während das BE mit der gleichen Bezeichnung „d“ in der Wissensbank der Tragwerksplanung die statische Nutzhöhe eines Bemessungsquerschnittes definiert. Bei Anwendung beider Wissensbanken auf das *BIM* ohne zusätzliche Vorkehrungen würde bei Ausführung der Inferenzprozesse der weiteren Wissensbank ein abweichender Wert für das Berechnungselement „d“ gegenüber der vorherigen Auswertung resultieren. Die Änderungskontrolle würde versuchen, die Werte beeinflusster Berechnungselemente zu ermitteln. Diese BE's sind jedoch in der weiteren Wissensbank möglicherweise anders oder gar nicht deklariert. Infolgedessen können die Berechnungselemente in einen undefinierten Zustand geraten, wenn die Bindung an eine ihr zugehörige Wissensbank nicht beachtet wird. Um diese BE's im Rahmen einer Änderungskontrolle weiterhin differenzieren zu können, wurde die Ergänzung eines global eindeutigen Schlüssels (*Unique-ID*) der zugehörigen Wissensbank in den Berechnungselementen erforderlich. Dieser Schlüssel, den die zentrale Planungsapplikation jeder Wissensbank bei ihrer Einstellung in das Projekt vergibt, wird als Ergänzung zur gewerkespezifischen Berechnungselement-ID gespeichert.

- Bedingt durch die offene Architektur des Gesamtsystems kann hinsichtlich der Interoperabilität zwischen den gewerkespezifischen Wissensbanken aber auch ein Parameter identischer Aussage in verschiedenen Wissensbanken völlig unterschiedlich definiert werden. Beispielsweise könnte das Geometrieattribut der Wandbreite in der Wissensbank der Haustechnik mit „*b_Wand*“ und in der Wissensbank der Tragwerksplanung mit „*h_Wand*“ im Rahmen eines *PDM-Zugriffs* deklariert sein. Beide sprechen den gleichen Wert des Geometrieattributes Wandbreite an. Diese Problematik wird erschwert durch die Tatsache, dass die Wissensbanken der Fachplaner jeweils gleichzeitig in mehreren unabhängigen Planungsprojekten Verwendung finden können. Jede Art von Verbindung zwischen entsprechenden Parametern unterschiedlicher Wissensbanken darf demnach zur Konsistenzsicherung ausschließlich auf Projektebene stattfinden.

Zur Lösung dieser Problemstellung können verschiedenartige Ansätze in Betracht gezogen werden. Mit Hilfe eines erläuternden Beschreibungstextes kann durch die Verwendung intelligenter Suchalgorithmen ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Elementen trotz differenter Namensgebung in Betracht gezogen werden. Zum Zwecke der Überführung sprachlicher Definitionen in logische, automatisiert verarbeitbare Informationsstrukturen wurden *Semantische Netze* Schwerpunkt zahlreicher Forschungsvorhaben [SOW92], [HEL01]. Da aber mittels semantischer Suchalgorithmen keine absolute Sicherheit von Übereinstimmungen gewährleistet werden kann, ist deren Einsatz für kritische Berechnungen nur im Bereich interaktiver Unterstützung möglich. Für unkritischere Anwendungen ist bei entsprechender Treffsicherheit eine teil- oder vollautomatisierte Suche evtl. sinnvoll durchführbar. Diese Unterscheidung ist für das Vertrauen der Fachplaner in zugehörige Parameter von entscheidender Bedeutung.

Infolgedessen wird im *MORLA-Modell* eine klassische Mapping-Tabelle vorgesehen, in der jeder gemeinsam zu nutzende Parameter aus Wissensbank A einem korrespondierenden Parameter aus Wissensbank B zugeordnet wird. Diese Art der Zuordnung ermöglicht eine für Bemessung und Nachweise hinreichende Konsistenzsicherung, da alle verwendeten Parameter zweifelsfrei unterschieden werden können. Dieses Verfahren erfordert jedoch auch einen erheblichen administrativen Aufwand, da sämtliche Zuordnungen je Projekt unter Beachtung

aller verwendeten Wissensbanken manuell getroffen werden müssen. Diese Zuordnung wird durch erläuternde Beschreibungstexte der zuzuordnenden Berechnungselemente erleichtert. Die Beschreibungstexte können unter Umständen auch für automatisierte semantische Mappingverfahren Verwendung finden.

- Aufgrund der verteilten Planungsumgebung soll auch im Rahmen der von einem Planungsbeteiligten angestoßenen Inferenz der Zugriff auf Werte von BE's ermöglicht werden, die in der gewerkespezifischen *MORLA-Wissensbank* anderer Planungsbeteiligter abgelegt sind.

So muss beispielsweise der Fachplaner A für den Nachweis des Wärmeschutzes auf die Materialart bzw. Rohdichteklasse der Mauerwerkssteine zugreifen. Diese Eigenschaft wurde im Rahmen der betrachteten Projektbearbeitung vom Fachplaner B für den statischen Nachweis durch eine Instanz der Berechnungselementklasse *Benutzereingabe* vorgegeben. In einem anderen Projekt wird sowohl die statische Bemessung als auch der Nachweis des Wärmeschutzes vom Fachplaner B übernommen. Die für das Führen der Nachweise des Wärmeschutzes erforderlichen Instanzen von Berechnungselementen befinden sich ebenfalls in der Wissensbank des Fachplaners B.

Im erstgenannten Fall muss sichergestellt sein, dass die für den Nachweis des Wärmeschutzes in der Wissensbank des Fachplaners B beinhalteten Nachweisselektionen samt der hierfür erforderlichen Instanzen von Berechnungselementen im Rahmen der Inferenz nicht als *erforderlich* identifiziert werden.

Unter Beibehaltung der offenen *MORLA-Modell*-Architektur wird der Zugriff auf Werte von Berechnungselementen in unterschiedlichen *MORLA-Wissensbanken* durch die Berechnungselementklasse *Fremdzugriff* (FZG) ermöglicht. Hierfür wird serverseitig eine *funktionale Mapping-Tabelle* vorgehalten, in der die *Fremdzugriffe* verwaltet werden (siehe Abbildung 4.13).

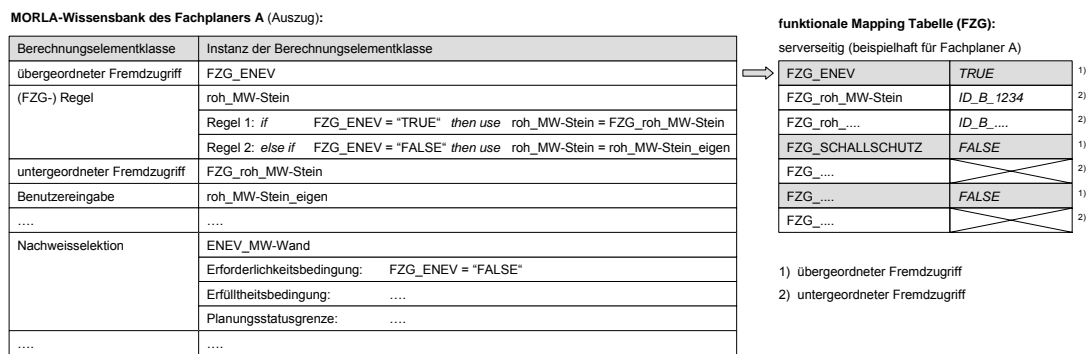


Abbildung 4.13: Abhängigkeits- und Einflussnetz

In der projektbezogenen, serverseitigen Mapping-Tabelle wird zunächst der Zugriff auf vordefinierte, nachweispezifische Berechnungselemente mit Hilfe sogenannter *übergeordneter Fremdzugriffe* deklariert (bool: "TRUE" → 'fremd'; "FALSE" → 'eigen'). Im Fall der Auswertung mittels „eigener“ Berechnungselemente entfällt die Definition des Verweises auf weitere BE's durch sogenannte *untergeordnete Fremdzugriffe*. Findet sich innerhalb einer gewerkespezifischen MORLA-Wissensbank im Rahmen der Auswertung eine Instanz der BE-Klasse *Fremdzugriff* (übergeordnet), so wird zunächst in der projektbezogenen, serverseitigen Mapping-Tabelle die Zugriffsart evaluiert. Mit Hilfe einer Instanz der Klasse *Regel* wird innerhalb der gewerkespezifischen Wissensbank die Verwendung der Berechnungselemente geregelt. Infolge der Deklaration der Zugriffsart mittels einem *übergeordnetem Fremdzugriff* können mehrere Parameter (*untergeordnete FZG's*) gesteuert werden.

Mit den vorgestellten Mechanismen des Inferenzprozesses werden die Projektbeteiligten im üblicherweise iterativ ablaufenden Planungsprozess mit seinen komplexen Abhängigkeiten adäquat unterstützt.

KAPITEL 5

FUZZY-MODELLE FÜR SENSITIVITÄTSANALYSEN INFOLGE PLANUNGSÄNDERUNGEN

Im Rahmen von Änderungen während des Planungsprozesses wird vom planenden Ingenieur größtenteils gefordert, dass er ad-hoc im Laufe einer Planungsbesprechung aus der Planungsänderung resultierende Konsequenzen abschätzen kann. Infolge seiner Evaluierung werden Änderungswünsche realisiert oder auch wieder verworfen. Bei der Auswertung greift der Ingenieur auf sein, im Laufe seiner Tätigkeit erlangtes Erfahrungswissen zurück. Er bestimmt mit diesem Expertenwissen die betroffenen Elemente und schätzt die Konsequenzen infolge der Planungsänderung ab. Hierdurch ist er in der Lage, bei kleinen Planungsmodellen und / oder begrenzten Teilmodellen die durch die Planungsänderung betroffenen Bauteile zu identifizieren und eventuelle Konsequenzen zu analysieren. Eine sofortige, umfassende Abschätzung aller Auswirkungen einer tief greifenden Planungsänderung ist aufgrund der Komplexität der Beurteilung der Relationen nur begrenzt möglich.

Üblicherweise kennzeichnet die *Sensitivität* in der Statistik eine Maßzahl für den Anteil einer Menge mit einem bestimmten Merkmal die durch die Anwendung einer Verifizierung mit der betrachteten Merkmalsausprägung als positiv evaluiert werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die *Sensitivitätsanalyse* charakterisiert durch die Untersuchung, wie sensibel einzelne Parameter im Gebäude-Informationen-Modell auf die Modifikation von Basisgrößen reagiert. Es

werden planungsrelevante Konsequenzen computerunterstützt approximiert. Die resultierenden Ergebnisse dienen dem Anwender als Entscheidungsunterstützung.

Eine rein deterministische Betrachtung der von einer Planungsänderung betroffenen PDM-Instanzen führt in einem Abhängigkeitsnetz sehr schnell zu einer unüberschaubar großen Anzahl betroffener Bauteile für alle am Planungsprozess beteiligten Gewerke. Mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sensitivitätsanalyse erfolgt durch die ergänzende Abschätzung von Konsequenzen betroffener Parameter eine aussagekräftige Bewertung, die eine qualitative Einschätzung der Planungsänderung durch den Anwender ermöglicht.

Die Abbildung des für die Sensitivitätsanalyse erforderlichen komplexen Expertenwissens bedarf hierbei einer geeigneten Repräsentationsform. Unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen der vorliegenden Arbeit werden Methoden der *Fuzzy-Logik* für die angestrebte Wissensrepräsentation eingesetzt. Die Art der zu verwendenden *Fuzzy-Modelle* wird in Abhängigkeit von ihrem Einsatzgebiet bestimmt. Während in [FRE05] für die Bauablaufplanung und in [ALB02] für die Entwurfsplanung *funktionale Fuzzy-Modelle* Anwendung fanden, erfolgt die Wissensrepräsentation für das Änderungsmanagement mit Hilfe *logischer Fuzzy-Modelle*. Diese bieten für die Repräsentation des unscharfen Wissens neben der Möglichkeit der manuellen Wissensakquisition auch eine transparente Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Infolge der konjunktiven Verknüpfung eignen sich logische Fuzzy-Modelle besonders gut zur angestrebten Wissensrepräsentation, da aufgrund der hohen Varianz von Eingangsgrößen möglicher Änderungsprozesse die Informationen zur Erstellung der erforderlichen Regelbasis naturgemäß nur unvollständig vorliegen [DUP00].

Das Fuzzy-Modell muss in der Lage sein, die Fähigkeit des „qualifizierten“ Ingenieurs zu repräsentieren und eine zuverlässige Abschätzung von Konsequenzen in Abhängigkeit bekannter vorgegebener Randbedingungen zu treffen. Entsprechend der erhöhten Unschärfe der Abschätzung des Ingenieurs bei größeren Veränderungen der Eingangsparametern kann das approximierte Ergebnis des Fuzzy-Modells in diesen Fällen ebenfalls eine geringere Aussagekraft bzw. Spezifität beinhalten.

Bei der Formalisierung wurde darauf geachtet, dass trotz einer hohen Anzahl möglicher Eingangsgrößen, die Überschaubarkeit – und somit die Transparenz – des Modells gewährleistet bleibt.

5.1 Charakteristische Eigenschaften logischer Fuzzy-Modelle bei der Anwendung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse

5.1.1 Bestimmung adäquater Fuzzy-Operatoren

Nach der Definition der Zugehörigkeitsfunktion der einzelnen linguistischen Variablen sowie nach dem Erstellen der Regelbasis folgt die Wahl geeigneter Operatoren für die Aggregation, die Implikation und die Akkumulation.

Aggregation:

Trotz einer eventuell hohen Anzahl von Eingangsvariablen wird aus Gründen der Sicherstellung der Transparenz angestrebt, die Anzahl der Regeln auf ein Minimum zu reduzieren. Daher findet neben der UND- auch die ODER-Verknüpfung im Rahmen der Formalisierung logischer Fuzzy-Modelle Anwendung. Die Aggregation erfolgt mit dem *MIN*-Operator (t-Norm) bei einer UND-Verknüpfung und dem *MAX*-Operator (s-Norm) bei einer ODER-Verknüpfung.

Implikation:

Für die Implikation stehen im Rahmen der Anwendung logischer Fuzzy-Modelle bei der Sensitivitätsanalyse für Planungsänderungen die sicherheitsqualifizierenden Implikations-Operatoren nach Kleene-Dienes sowie nach Lukasiewicz zur Auswahl. Der Lukasiewicz-Operator erweitert den unscharfen Bereich, welcher beim Kleene-Dienes-Operator in der Konklusionsmenge abgebildet wird. Aufgrund von Grenzfallbetrachtungen wird der Operator nach Lukasiewicz für die Implikation angewendet. Vergleiche mit einer nachträglich erarbeiteten Parameterstudie zeigen, dass im Hinblick auf die reale Bemessung stets ein plausibler Wert des Fuzzy-Modells approximiert wird.

Akkumulation:

Gemäß dem *Prinzip der minimalen Spezifität* erfolgt eine konjunktive Kombination der negativen Informationen \tilde{A}^j , $j=1, \dots, m$ [WEI98], [DUP03]) mit Hilfe eines t-Norm-Operators. Durch den hier verwendeten *MIN*-Operator wird sichergestellt, dass nur ein eindeutiges Maximum in der Ergebnismenge resultiert. Steigungswechsel unterhalb dieses Maximalwertes sind nicht möglich. Somit ist gewährleistet, dass stets ein eindeutiger Wert defuzzifiziert werden kann.

Infolge der konjunktiven Verknüpfung besteht die Möglichkeit, die Regelbasis mit weiteren Eingangsvariablen und Regeln bzw. Restriktionen zu erweitern.

5.1.2 Defuzzifikation von Fuzzy-Ergebnismengen

Aufgrund der Anwendung logischer Implikations-Operatoren erscheint zunächst eine *Defuzzifikation* der Fuzzy-Ergebnismenge auf den ersten Blick nicht sinnvoll. Es besteht die Gefahr, dass bei einer gering aussagekräftigen Regelbasis keine Regel einen Aggregations-Konfidenzgrad größer gleich null für betrachtete Eingangsgrößen liefert. Durch die logische Implikation wird die Ergebnismenge somit nicht eingeschränkt. Aus der akkumulierten Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}$ resultiert bei der *Defuzzifikation* ein singulärer Ausgangswert. Dieser befindet sich im vorliegenden Fall jeweils genau im Zentrum des Definitionsbereichs der Ausgangsvariablen. Der defuzzifizierte Wert hätte jedoch keinerlei Informationsgehalt. Daher erfolgt für *implikative Fuzzy-Mengen* üblicherweise anstelle der *Defuzzifikation* eine *linguistische Approximation* der Ergebnismenge [ESM81], [DVO97], [FSH02b], [LUB02]. Das angestrebte Ziel einer Visualisierung des Grades einer Konsequenz infolge einer Planungsmodifikation erfordert jedoch einen scharfen defuzzifizierten Wert. Für die notwendige Beibehaltung der Informationen aus dem Verlauf der Zugehörigkeitsfunktion wurde daher ein zusätzlicher Parameter für die *Spezifität* des defuzzifizierten Ergebnisses erarbeitet.

Zur Defuzzifikation der resultierenden Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}$ wird in dieser Arbeit das Verfahren *NMTCOG* (Nearest Maximum To Center Of Gravity) angewandt. Dieses, eigens für die Belange der Auswertung logischer Fuzzy-Modelle

erarbeitete Verfahren vereinigt Eigenschaften bisher bekannter Defuzzyfikations-Methoden, welche nachfolgend erläutert werden:

Maximummethode (MAX):

Bei dieser Methode wird der Wert der Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{A}^i \rightarrow \tilde{B}^j}$ gewählt, welcher den maximalen Wahrheitsgehalt besitzt. Ist dieser Wert, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, nicht eindeutig definierbar, wird in Abhängigkeit des Auswertungsmechanismus das rechte (ROM) bzw. linke (LOM) Maximum verwendet.

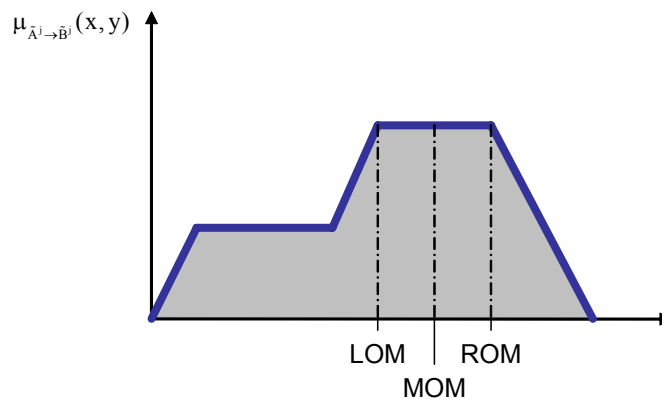


Abbildung 5.1: Defuzzyfikation mit Maximummethode (MAX)

Mittelwert der Maxima (Mean of Maxima - MOM):

Hierbei wird anstelle des rechten bzw. linken Maximums der Mittelwert der Maxima bestimmt. Die beiden gängigen Methoden *MAX* und *MOM* sind für einen Großteil von Anwendungen geeignet. Sie haben jedoch den entscheidenden Nachteil, dass nur die den Maximalwert erzeugenden Regeln berücksichtigt werden. Die Implikationsergebnisse aller weiteren Regeln, also die nicht das Maximum erzeugende Fläche, bleiben jedoch unberücksichtigt. Dies kann einen erheblichen Informationsverlust zur Folge haben.

Schwerpunktmethode (Center of Gravity - COG):

Das *COG*-Verfahren verringert den Verlust von Informationsgehalten. Bei der Methode *COG* wird der defuzzyfizierte Wert $y_{\text{def,COG}}$ als Schwerpunkt der durch die

Zugehörigkeitsfunktion der Ergebnis-Fuzzy-Menge aufgespannten Fläche bestimmt. Ein Beispiel für die Ermittlung des Flächenschwerpunktes zeigt Abbildung 5.2.

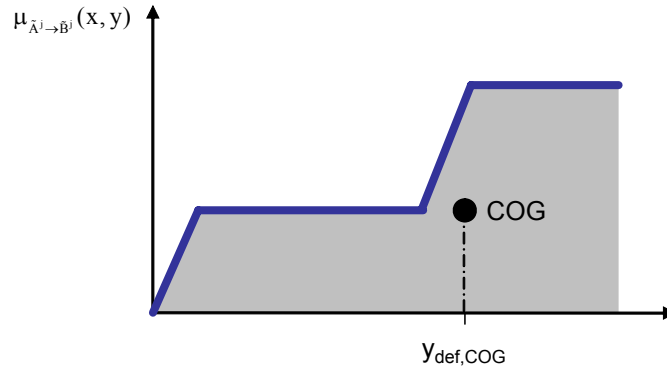


Abbildung 5.2: Defuzzifikation mit *COG*-Methode

Die Berechnung des Flächenschwerpunktes erfolgt über die Integrale der Zugehörigkeitsfunktionen:

$$y_{\text{def, COG}} = \frac{\int y \cdot \mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) dy}{\int \mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) dy} \quad (5.1)$$

Flächenschwerpunktmethode (Center of Area - COA):

Die *COA*-Defuzzifikation berechnet den Ausgabewert mit Hilfe der durch die Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}$ der Ausgabe-Fuzzy-Menge aufgespannten Fläche. Der Ausgabewert ist durch den Punkt des Definitionsbereichs Y gegeben, für welchen die links und rechts von diesem Punkt liegenden Flächenteile identisch sind:

$$y_{\text{def, COA}} = \int_a^{y_{\text{def}}} \mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) dy = \int_{y_{\text{def}}}^b \mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) dy \quad (5.2)$$

Die Methode *COA* liefert ähnliche Rückgabewerte wie das *COG*-Verfahren. Sie liegen jedoch erfahrungsgemäß in Randbereichen etwas weiter auseinander, d.h. mit *COA* vergrößert sich der mögliche Wertebereich im Gegensatz zu *COG* geringfügig [ALT93].

Im Gegensatz zu den Maximum-Methoden berücksichtigen die *COG*- und *COA*-Verfahren den gesamten Verlauf der resultierenden Zugehörigkeitsfunktion. Dennoch ist bei diesem Verfahren ebenfalls ein großer Informationsverlust nicht auszuschließen, da hierbei Werte mit dem größten Wahrheitsgehalt möglicherweise „weit entfernt“ vom Flächen- oder Massenschwerpunkt entfernt liegen können.

NMTCOG - Nearest Maximum to Center Of Gravity:

Um die positiven Eigenschaften der aufgeführten Typen von Defuzzifikationsmethoden zu vereinen, wird bei dem zu erarbeitenden logischen Fuzzy-System das *NMTCOG*-Verfahren verwendet. Das Verfahren ist als eine Fusion der beiden Verfahren *MAX* und *COG* anzusehen. Beim *NMTCOG*-Verfahren wird diejenige Größe als Ausgangsgröße ermittelt, welche sich an der Maximalstelle der Zugehörigkeitsfunktion befindet. Wenn diese nicht eindeutig identifizierbar ist (siehe Abbildung 5.3), so wird die Maximalstelle, die sich am nächsten zum Schwerpunkt der gesamten Ausgangsmenge befindet, als maßgebende Stelle defuzzifiziert:

$$y_{\text{def,NMTCOG}} = \text{MIN} \left(\text{MAX}(\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y)) - \frac{\int y \cdot \mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) dy}{\int \mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) dy} \right) \quad (5.3)$$

Da aufgrund der Verwendung des MIN-Operators im Rahmen der Akkumulation gewährleistet ist, dass die maximalen Wahrheitswerte sich stets zusammenhängend in einem Bereich befinden, wird der Informationsverlust aller aufgezählten Verfahren beim *NMTCOG*-Verfahren minimiert.

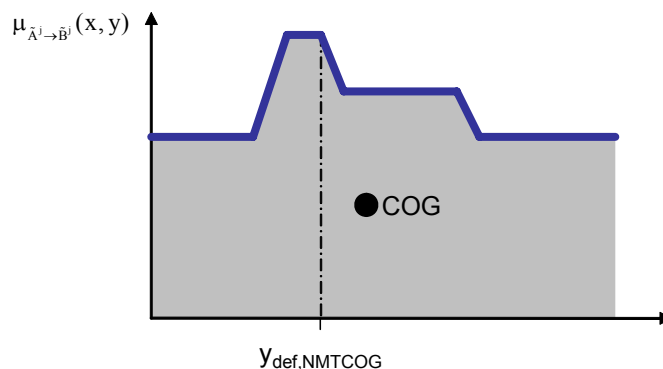


Abbildung 5.3: Defuzzifikation mit NMTCOG-Methode

5.1.3 Definition der Spezifität von Fuzzy-Ergebnismengen

Infolge der Defuzzifikation mittels des *NMTCOG*-Verfahrens erhält der Anwender einen präzise definierten Ausgabewert. Unerlässlich ist es jedoch, den Wahrheitsgehalt bzw. die *Spezifität* der defuzzifizierten Größe zu bestimmen [DUP85]. Da eine Defuzzifikation immer mit einem erheblichem Informationsverlust verbunden ist, wurde ein Verfahren entwickelt, welches eine detailliertere Analyse der Ergebnismenge in Ergänzung zur Defuzzifikation ermöglicht.

Üblicherweise werden die gewonnenen Akkumulationsergebnisse „linguistisch“ (in Worten) approximiert. Zur übersichtlichen Visualisierung der Ergebnisse im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde die Bestimmung eines konkreten Parameters vorgezogen. Mit Hilfe dieses Parameters kann so das Erscheinungsbild der Ergebnismenge subjektiv bewertet werden.

Im Folgenden wird die mathematische Herleitung des Parameters zur Bestimmung der *Spezifität* von Ergebnismengen *PDS* (*Parameter for Determination of Specifity*) erläutert.

5.1.3.1 Herleitung des PDS

Der Grundgedanke bei der Entwicklung des *PDS* besteht darin, alle Flächenanteile der Ergebnismenge zu erfassen und diese entsprechend zu gewichten. Dieses subjektive Vorgehen hat das Ziel, alle für die Ergebnismenge relevanten Regeln zu berücksichtigen, um eine Spezifität auf einer Skala von 0 bis 1 zu bestimmen. Der *PDS* setzt sich hierbei aus zwei Multiplikatoren zu folgender Gleichung zusammen:

$$PDS = \sqrt{PDS_I} \cdot PDS_{II} \quad (5.4)$$

Mit dem Faktor PDS_I werden alle Flächenanteile mit ihrem Schwerpunktsabstand bezogen auf die Lage des *NMTCOG* berücksichtigt. Hierbei muss sich beispielsweise eine große Fläche mit einem weit entfernten Schwerpunktsabstand zum *NMTCOG* negativ auf den Faktor PDS_I auswirken. Abbildung 5.4 verdeutlicht dieses Vorgehen für das infinitesimal breite Flächenelement mit der Höhe bzw. dem Zugehörigkeitsgrad $\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y)$ und der Breite dy .

$$PDS_I = 1 - \frac{\int_0^{y_{\text{def}}} \mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) \cdot |y - y_{\text{NMTCOG}}| dy}{\int_0^{y_{\text{def}}} \mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) dy} \quad (5.5)$$

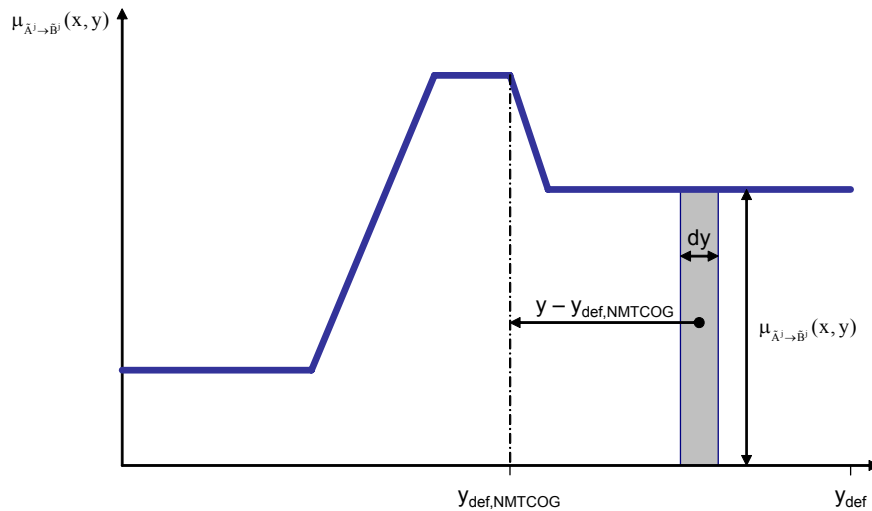


Abbildung 5.4: $PDS_I \rightarrow$ Berücksichtigung der gewichteten Flächenschwerpunktlage

Aus der Validierung des PDS sowie bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse aus einem Fuzzy-Modell mit einer vergleichenden Parameterstudie resultierte, dass infolge des Radizierens des Faktors PDS_I mit der Quadratwurzel eine adäquatere qualitative Repräsentation der *Spezifität* der Zugehörigkeitsfunktion möglich ist.

Der Faktor PDS_{II} berücksichtigt den Flächenanteil des Funktionsverlaufs $\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y)$ einer Fuzzy-Ergebnismenge. Befindet sich in der Regelbasis \mathcal{K} keine Regel zur Restriktion möglicher Lösungen für betrachtete Eingangswerte, so ist der Aussagegehalt der Ergebnismenge gleich Null. Dieser Sachverhalt wird durch den Faktor PDS_I allein nicht repräsentiert. Durch die Multiplikation mit dem Faktor PDS_{II} wird die Fläche der Ergebnismenge bzw. das Integral unter der Zugehörigkeitsfunktion in Bezug auf die Gesamtfläche berücksichtigt.

Beträgt der maximale Zugehörigkeitsgrad $\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j, \max}(x, y) < 1$, so wird der resultierende Funktionsverlauf $\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y)$ normiert:

$$\mu'_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) = \mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) \cdot \frac{1}{\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j, \max}(x, y)} \quad (5.6)$$

Abbildung 5.5 verdeutlicht die Wirkungsweise dieser „Anhebung“.

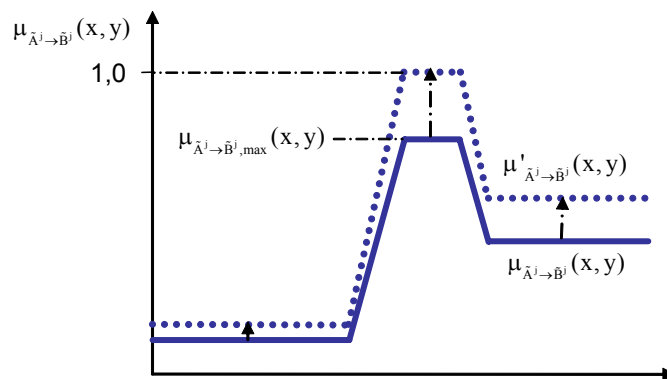


Abbildung 5.5: Normierung der Ergebnis-Fuzzy-Menge

Somit bestimmt sich der Faktor PDS_{II} zu:

$$PDS_{II} = 1 - \frac{\int_0^{y_{def}} \mu'_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y) dy}{y_{def}} \quad (5.7)$$

5.1.3.2 Validierung und Interpretation des PDS

Der quantitative Wert des PDS stellt zunächst eine rein subjektive Bewertung dar, dessen objektiv adäquater Verlauf für variierende Parameter qualitativ nachzuweisen ist. Im Folgenden werden daher unter Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen die Ergebnisse des *PDS*-Bewertungsalgorithmus validiert. Für eine Untersuchung wurde der in Abbildung 5.6 vereinfachte, normierte Verlauf der Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{A}^j \rightarrow \tilde{B}^j}(x, y)$ unter Vernachlässigung unscharfer Randbereiche mit den aufgeführten Variablen zugrunde gelegt.

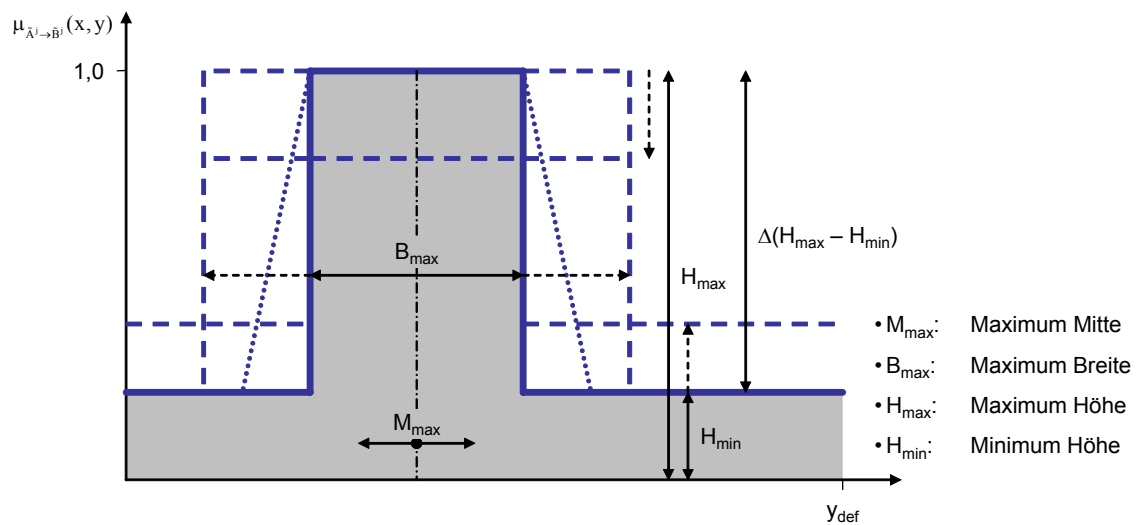


Abbildung 5.6: Vereinfachter Verlauf der Zugehörigkeitsfunktion zur Validierung des PDS

Für die Analyse des *PDS* wurden die Parameter B_{\max} , H_{\min} ($\rightarrow \Delta(H_{\max} - H_{\min})$) sowie die Lage von M_{\max} variiert. Die hieraus resultierenden grundlegenden charakteristischen Eigenschaften des *PDS* sind in Tabelle 5.1 und den Diagrammen der Abbildung 5.7 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Zusammenstellung charakteristischer Verläufe des PDS

Nr.	Lage M_{\max}	$\Delta(H_{\max} - H_{\min})$	B_{\max}	PDS	Diagramm
1	konstant	abfallend	konstant	abfallend	5.7.a + 5.7.b
2	konstant	ansteigend	konstant	ansteigend	5.7.a + 5.7.b
3	konstant	konstant	ansteigend	abfallend	5.7.a
4	konstant	konstant	abfallend	ansteigend	5.7.a
5	Randber. \rightarrow Zentrum	konstant	konstant	ansteigend	5.7.b
6	Zentrum \rightarrow Randber.	konstant	konstant	abfallend	5.7.b

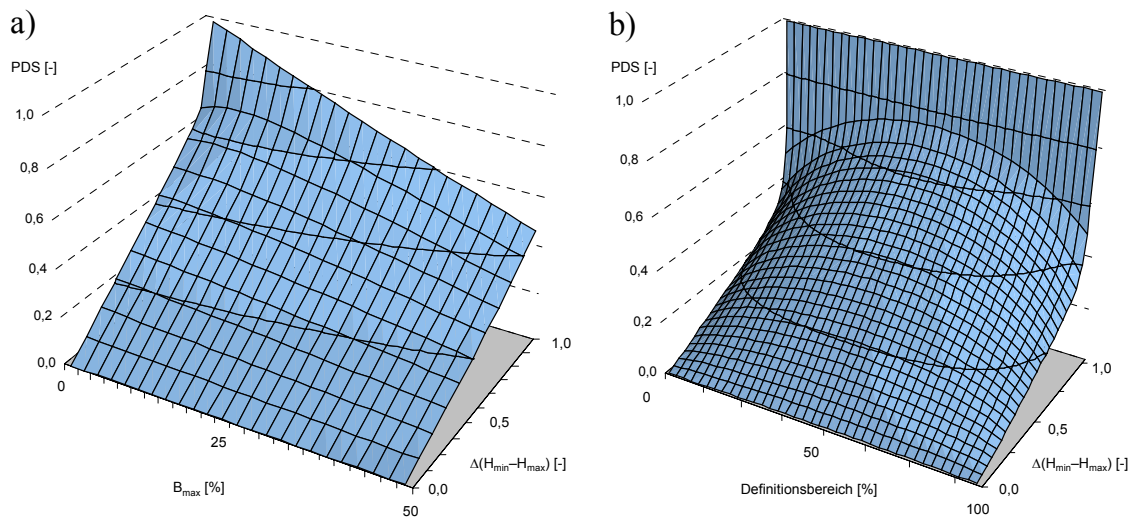


Abbildung 5.7: PDS-Verlauf in Abhängigkeit von:

a) B_{max} und $\Delta(H_{max} - H_{min})$

b) Lage M_{max} und $\Delta(H_{max} - H_{min})$

Der im Diagramm a) der Abbildung 5.7 dargestellte Verlauf des PDS repräsentiert den erforderlichen Rückgang der Spezifität einer Fuzzy-Ergebnismenge bei einer Verbreiterung des Maximums der Zugehörigkeitsfunktion B_{max} , d.h. bei einer geringeren Restriktion möglicher Werte. Dieses Charakteristikum wird bei einer Verringerung der Differenz von maximalem und minimalem Konfidenzgrad $\Delta(H_{max} - H_{min})$ zusätzlich verstärkt. Gleichzeitig wird mit dem dargestellten Verlauf die geforderte Steigerung der *Spezifität* im Fall einer Vergrößerung der Differenz von maximalem und minimalem Konfidenzgrad $\Delta(H_{max} - H_{min})$ bestätigt. Diese Eigenschaft verläuft demnach konform mit den Überlegungen, dass mit steigender Anzahl möglicher Werte mit einem Zugehörigkeitsgrad von H_{min} (infolge geringer Restriktionen) eine unsicherere Aussage resultiert. Der größtmögliche Wert 1 der Spezifität stellt sich infolge minimaler Breite des Maximums der Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{A^i \rightarrow B^j}(x, y)$ bei gleichzeitig größtmöglicher Differenz des maximalen und minimalen Konfidenzgrades $\Delta(H_{max} - H_{min})$ von 1,0 ein. Im Extremfall liegt ein so genannter *Singleton* vor.

Diagramm b) der Abbildung 5.7 zeigt neben der Zunahme des PDS bei einer Steigerung der Differenz des maximalen und minimalen Konfidenzgrades $\Delta(H_{max} - H_{min})$ auch den erforderlichen Rückgang der *Spezifität* im Fall der

Verschiebung der Lage des Maximums der Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{A^j \rightarrow B^j}(x, y)$ vom Zentrum zu den Randbereichen des Definitionsbereichs. Dieses Charakteristikum verläuft konform mit den Überlegungen, dass die Präsenz nicht restringierter Werte mit steigendem Abstand zur Lage von M_{\max} , und somit vom defuzzifizierten Wert y_{def} , den Informationsgehalt bzw. die *Spezifität* der Fuzzy-Menge reduziert.

5.1.4 Kohärenz der Regelbasis logischer Fuzzy-Modelle

Zur Vermeidung inkonsistenter Konklusionen wird eine Validation regelbasierter Fuzzy-Modelle erforderlich. Infolge der konjunktiven Akkumulation der Implikationsergebnisse ist die Kohärenz der Regeln bzw. Restriktionen einer Regelbasis \mathcal{K} logischer Fuzzy-Modelle zu überprüfen [DPU97]. Die Überprüfung der Kohärenz einer Regelbasis \mathcal{K} im Rahmen der Verarbeitung logischer Fuzzy-Regeln ist nur dann ausführbar, wenn die Fuzzy-Mengen möglicher Werte $\{y, \pi_{(\rightarrow)}^{\mathcal{K}}(x, y) \mid y \in Y\}$ normiert sind für alle $x \in X$ [DUP94], [DPU03] (\triangleq Addition der Konfidenzgrade an einer singulären Stelle des Definitionsbereich entspricht 1). Dies wurde bei der Formalisierung der Fuzzy-Mengen berücksichtigt.

Bei einem resultierenden Konfidenzgrad von 1,0 des Aggregationsergebnisses normierter Fuzzy-Mengen aus exakt einer Regel der Regelbasis \mathcal{K} darf keine weitere Regel die ermittelte Fuzzy-Ergebnismenge restringieren. Dieser Sachverhalt wird im Rahmen der Auswertung der prototypisch implementierten Softwarekomponente zur Definition logischer Fuzzy-Modelle überprüft.

Grenzfallbetrachtungen

Betrachtet man den Grenzfall, dass zwei unterschiedliche – für das akkumulierte Ergebnis maßgebende – Regeln infolge der Aggregation jeweils einen resultierenden Konfidenzgrad von 0,5 aufweisen, so ist die *Spezifität* der Ergebnismenge charakterisiert durch den verwendeten Implikationsoperator. Wie in Abbildung 5.8 zu sehen ist, lässt die mit Hilfe des MIN-Operators akkumulierte Ergebnismenge im Fall der Anwendung des Kleene/Dienes-Operators jegliche Spezifität vermissen. Infolge der Erweiterung des unscharfen Bereichs bei Anwendung des Lukasiewicz-

Operators bildet sich jedoch unter Zugrundelegung gleicher Eingangsparameter und Mengendefinitionen ein deutliches Maximum in der Ergebnismenge aus.

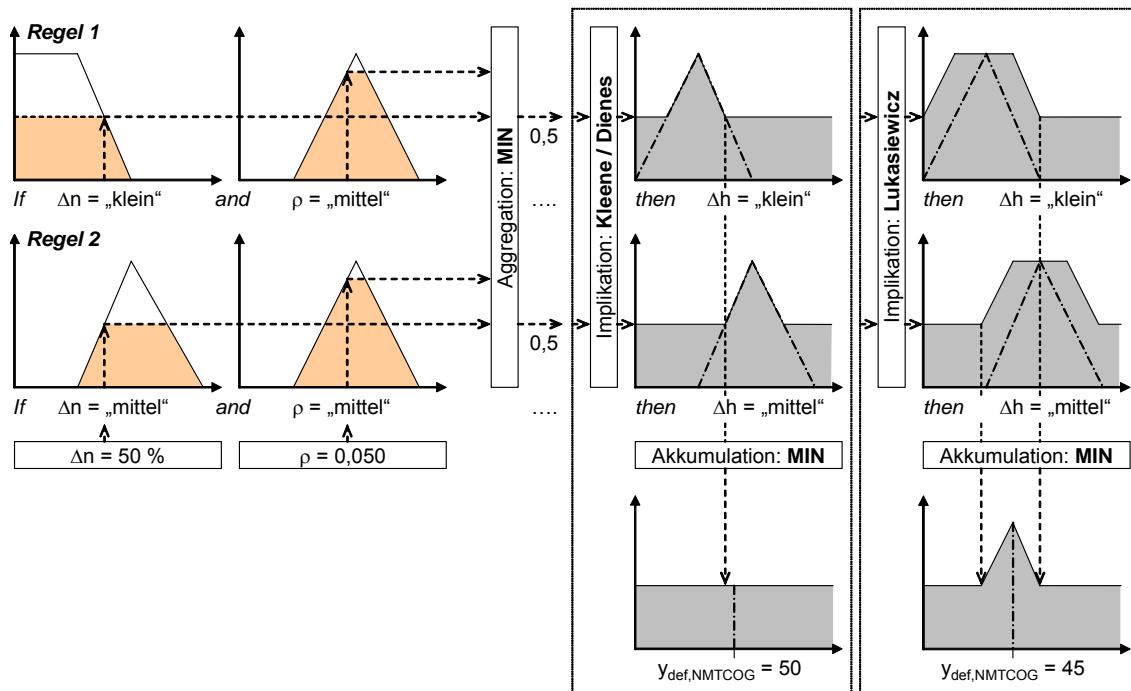


Abbildung 5.8: Funktionsweise der Auswertung logischer Fuzzy-Modelle unter Verwendung des Kleene/Dienes- und Lukasiewicz-Implikationsoperators

Jedoch besteht auch bei Anwendung des Lukasiewicz-Implikationsoperators die Gefahr, dass in Abhängigkeit der gewählten Unschärfen – d.h. in Abhängigkeit der Steigung der Fuzzy-Mengen – sich die Maxima bei der Akkumulation gegenseitig aufheben. Dieses Charakteristikum steigt mit zunehmender „Schärfe“ (Steigung) bei der Definition von Fuzzy-Mengen an.

5.2 Fuzzy-Modell für die Sensitivitätsanalyse infolge Planungsänderungen zentrisch belasteter Stahlbetonwände

Die Sensitivitätsanalyse infolge Planungsänderungen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft für die Approximation einer eventuellen Verbreiterung zentrisch belasteter Stahlbetonwände als Konsequenz aus einer Veränderung von

Randbedingungen. Hinsichtlich möglicher Planungsmodifikationen befasst sich diese Arbeit mit den häufig auftretenden Fällen der Lasterhöhung auf tragende Wände (siehe Abbildung 5.9: z.B. infolge einer Nutzungsänderung, einer Erhöhung der Geschossanzahl, o. ä.) oder / und einer Vergrößerung der Wandhöhe (z.B. infolge einer Raumerhöhung als Konsequenz einer Vergrößerung von Haustechnikkanälen).

Die erforderliche Regelbasis \mathcal{K} wurde zunächst mit Hilfe von ingenieurmäßigem „a priori“ Wissen und Erfahrung formalisiert. Im Anschluss daran wurden die aus dem erarbeiteten logischen Fuzzy-Modell für die Sensitivitätsanalyse approximierten Ergebnisse mit Hilfe einer im Rahmen dieser Arbeit erstellten Parameterstudie verifiziert und die Resultate auf ihre Plausibilität hin evaluiert.

5.2.1 Bemessung von Stahlbetonwänden

Aus Sicht der Tragwerksplanung werden in Anlehnung an die DIN 1045-1 [DIN01] folgende Randbedingungen zugrunde gelegt:

- Die Wand befindet sich in einem ausgesteiften System
- Es liegt keine Momentenbeanspruchung vor (zentrische Belastung)
- Einspannungen werden vernachlässigt
- Die Materialgüte (Betongüte) bleibt unverändert

Die Grundlage für die Berechnung stellt das in Abbildung 5.9 dargestellte statische System einer zweiseitig gelenkig gelagerten Wand dar.

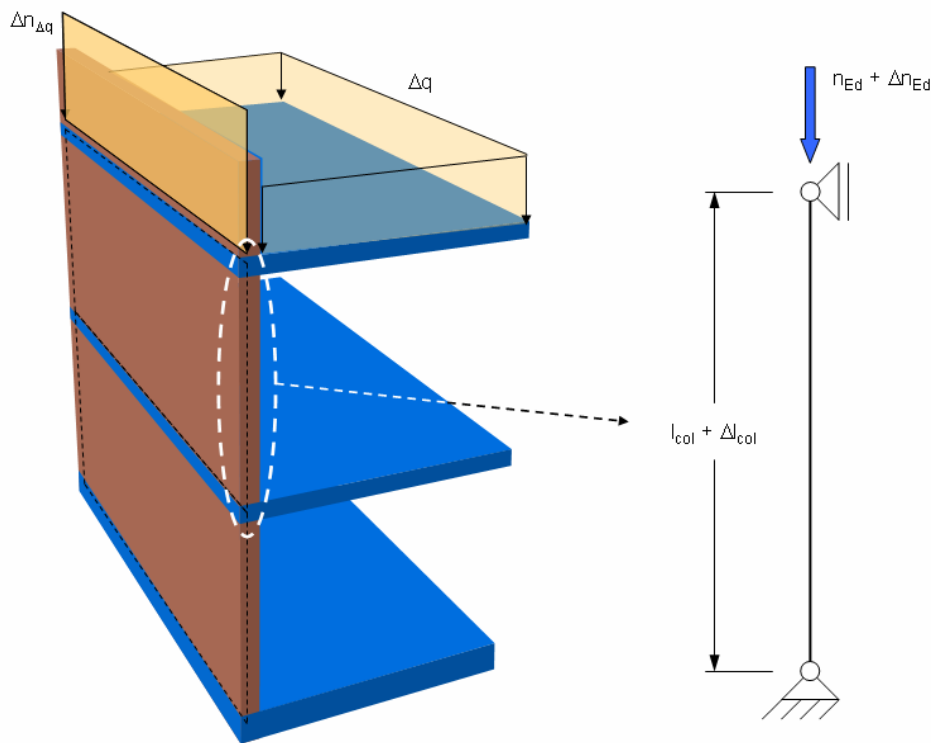


Abbildung 5.9: Statisches System zentrisch belasteter Wände

Dem erarbeiteten Fuzzy-Modell für die Sensitivitätsanalyse zentrisch belasteter Stahlbetonwände wurden die folgenden Planungsmodifikationen zugrunde gelegt:

- 1) Veränderung (Steigerung) der Vertikallast (Δn_{Ed})

Die Auswirkungen wurden für eine Veränderung der vorhandenen Vertikallast n_{Ed} in einem Bereich von 0 bis 200 % untersucht.

- 2) Veränderung (Steigerung) der Wandhöhe (Δl_{col})

Analog zur Vorgehensweise der Vertikallasterhöhung wurde eine Untersuchung von Konsequenzen infolge Veränderung der Wandhöhe Δl_{col} in einem Bereich zwischen 0 und 100 % durchgeführt.

- 3) Kombination aus 1. und 2. ($\Delta n_{Ed} + \Delta l_{col}$)

Die Konsequenzen wurden für eine kombinierte Modifikation im Bereich von 0 bis 200 % (Δn_{Ed}) bzw. 0 bis 100 % (Δl_{col}) evaluiert.

5.2.2 Definition der Fuzzy-Variablen

Aus Anforderungen zur Reduktion der Komplexität einerseits sowie der Lesbarkeit der Ergebnisse und somit der Transparenz andererseits wurde angestrebt, die Anzahl möglicher Eingangsvariablen gering zu halten, so dass die zu erstellende Regelbasis im Fall der Formalisierung aller möglichen Modifikationsvarianten nicht zu umfassend wurde. Des Weiteren wurden die linguistischen Werte der Eingangsvariablen auf ein Minimum reduziert, ohne dabei eine ausreichende Beschreibung dieser Eingangsgröße zu gefährden. Neben den Parametern zur Planungsmodifikation (Steigerung von Last Δn_{Ed} und Höhe Δl_{col}) werden der statische Ausnutzungsgrad ρ des Querschnitts sowie die Schlankheit λ als Eingangsvariablen dem logischen Fuzzy-Modell zugrunde gelegt.

Die vorhandene statische Ausnutzung ρ eines Wandquerschnittes repräsentiert einen wesentlichen Aspekt bei der Beurteilung der Tragfähigkeit. Die prozentuale Ausnutzung bezieht sich hierbei auf den nach DIN 1045-1 [DIN01] festgelegten maximalen Bewehrungsgehalt von 8 % des Gesamtquerschnittes.

Die Schlankheit λ ist eine weitere entscheidende Größe bei der Beschreibung einer Wand. Sie wird hier in einem Bereich $10 (\triangleq \text{„gedrungen“}) < \lambda < 100 (\triangleq \text{„schlank“})$ definiert. Hiermit werden die üblichen Schlankheiten von Wänden im Stahlbetonhochbau erfasst.

Wie bereits zuvor erläutert, wurden die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Regeln auf eine Ausgabevariable beschränkt. Dies stellt keine Einschränkung dar, denn jede Regel mit i Konsequenzen lässt sich in i Regeln mit identischen Bedingungen aber unterschiedlichen Konsequenzen j repräsentieren. Beispielhaft wurde im Rahmen dieser Arbeit die Veränderung der Wandstärke Δh als Ausgabevariable gewählt. Andere parallele Ausgangsvariablen wie z.B. eine Gewichtssteigerung sind möglich. Der Definitionsbereich für Δh wird von 0 bis 100 %, also bis zu einer Verdoppelung des Querschnittes festgelegt.

Nach der Bestimmung der Variablen können für diese die entsprechenden Mengen im Fuzzy-Modell abgebildet werden. Die Definition dieser Fuzzy-Mengen ist hierbei abhängig vom Wissen und der intuitiven Abschätzung des Ingenieurs. Bei der Definition der Fuzzy-Mengen muss sich der Experte die Ursachen von Veränderungen sowie plausible dazugehörige Größenordnungen vergegenwärtigen.

Aufgrund der intuitiven Definition von Mengen im Rahmen der Verarbeitung logischer Fuzzy-Mengen wird die Formalisierung mit normierten, linearen Dreieck-, Trapez- oder Rampenfunktionen ohne ergänzende linguistische Hecken als hinreichend exakt erachtet [OUS04], [DOE00].

Um die menschliche Eigenschaft, hinreichend genaue Aussagen im Rahmen kleinerer Modifikationen zu treffen, adäquat zu formalisieren, werden im Bereich geringfügiger Änderungen die Mengen der sich verändernden Variablen Δn_{Ed} und Δl_{col} , sowie der Ausgabevariablen Δh „schärfer“ (d.h. „enger“ und „steiler“) definiert. Äquivalent hierzu werden ungenauere Aussagen über mögliche Konsequenzen im Fall größerer Planungsänderungen durch größere Unschärfebereiche (geringere Steigungen / Gefälle in der Mengenerstellung) repräsentiert.

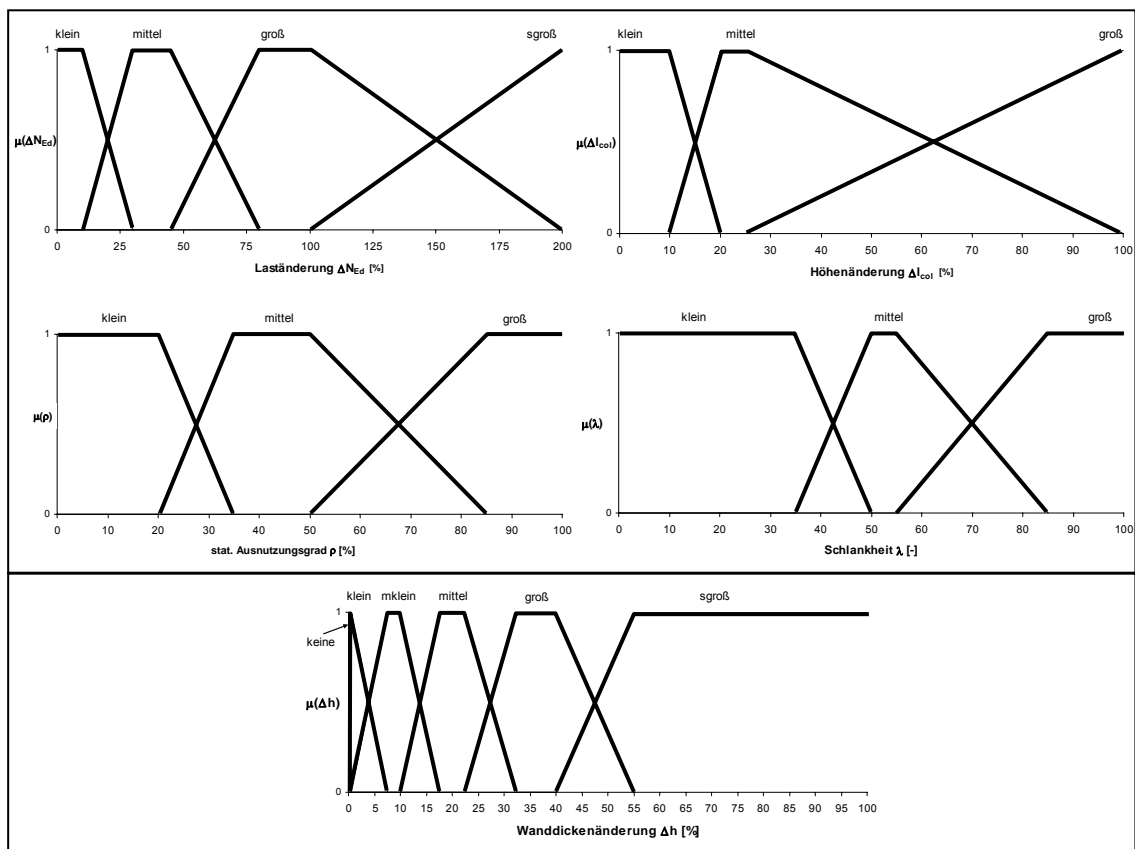


Abbildung 5.10: Fuzzy-Mengen für die Sensitivitätsanalyse einer Wandverbreiterung infolge einer Laststeigerung und / oder Wanderrhöhung

Da bei der Kombination von Laststeigerung Δn_{Ed} und Wanderrhöhung Δl_{col} die explizit für singuläre Modifikationen formalisierten Regeln 1 bis 31 (siehe

Anhang A) nicht „feuern“ dürfen, werden an der Stelle 0 des Definitionsbereichs jeweils ein Singleton $\delta_{N=}$ „keine“ und $\delta_{l=}$ „keine“ eingeführt. Somit werden die Regeln 1 bis 31 im Anhang A für die Kombination der beiden Beanspruchungen „ausgeschaltet“ (eliminiert).

Abbildung 5.10 zeigt die definierten Fuzzy-Mengen für die Sensitivitätsanalyse einer Wandverbreiterung für eine Laststeigerung und / oder einer Wanderhöhung. Das charakterisierende Fuzzy-Modell mit zugehöriger Regelbasis ist im Anhang A zusammengestellt.

5.2.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Fuzzy-Modell mit vergleichender Parameterstudie

Um die Qualität des manuell und intuitiv erstellten Fuzzy-Modells beurteilen zu können, werden die mit ihm approximierten Ergebnisse einer „exakten“ Bemessung aus einer Parameterstudie gegenübergestellt.

Folgende Randbedingungen liegen der Parameterstudie zugrunde:

- Baustoffe: Beton C30/37 in Ortbeton, Baustahl BSt 500 A
- Querschnitt wird auf 1,0 m Wandlänge bezogen
- Wandlänge $l_{\max} > 4 h_{\min}$ Wanddicke (nach [DIN01])
- Randabstand der Bewehrung $d_1 = 4$ cm (bleibt auch bei Querschnittsvergrößerung gleich / Annahme der Expositionsklasse XC1 mit $c_{\text{nom}} = 2$ cm)
- Die Querschnittsverbreiterung erfolgt vereinfachend in Iterationsschritten von $\Delta h = 2$ cm
- Verbreiterung des Querschnitts bei $\omega_{\text{tot}} \geq 2$, sowie bei einer statischen Ausnutzung größer 100 % ($A_{s,\text{tot}} \geq 0,08 \cdot A_c$)

Die Darstellung der Ergebnisse aus der Vergleichsanalyse erfolgt für die Modifikationen infolge einer ausschließlichen Laststeigerung Δn_{Ed} bzw. einer ausschließlichen Wanderhöhung Δl_{col} mit Hilfe von Punktdiagrammen. Hierin werden die Abweichungen der Wanddickenänderung „ δ_{h} “ aus Parameterstudie und Fuzzy-Modell ($\Delta h_{\text{PS-Fuzzy}}$ [%]) – bezogen auf die unterschiedlichen Lasterhöhungs- oder Wanderhöhungsstufen – repräsentiert (siehe

Abbildung 5.11A1+B1). Es ist erkennbar, dass der komplexe Vorgang einer Wandbemessung hinsichtlich einer eventuellen Wandverbreiterung Δh in adäquater Näherung abgebildet wird. Die Abweichungen entsprechen in ihrem Verlauf der Zielstellung, bessere Näherungen mit abnehmendem Grad der Modifikationen nachzuweisen und sind somit sehr zufriedenstellend. Größtenteils werden mit dem erarbeiteten Fuzzy-Modell geringfügig größere Werte approximiert. Das Modell liegt somit auf der sicheren Seite.

Für eine einheitliche Beurteilung der Abweichungen des Fuzzy-Modells wird die Gauß'sche Normalverteilungskurve herangezogen. Diese bietet die Möglichkeit, die Wahrscheinlichkeit für eine vorgegebene Toleranz zwischen den Ergebnissen des Fuzzy-Modells und der Parameterstudie zu bestimmen. Somit können die Ergebnisse unterschiedlicher Modifikationen einheitlich beurteilt werden.

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2} \quad (5.8)$$

mit: u : Umformung für Standardisierung $u = \frac{x - \mu}{\sigma}$

σ : Standardabweichung der Stichprobe $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$

μ : Erwartungswert der Stichprobe $\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$

x_i : Merkmalsausprägung des i-ten Elementes innerhalb einer Stichprobe mit dem Umfang n

Die Wahrscheinlichkeit P , dass sich ein Messwert innerhalb eines Intervalls $[a,b]$ befindet beträgt:

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b \varphi(x) dx \quad (5.9)$$

Hierdurch wird die Wahrscheinlichkeit für eine Abweichung des defuzzifizierten Ergebnisses vom Wert der Parameterstudie im betrachteten Intervall repräsentiert.

Der Auswertung im Rahmen dieser Arbeit wurde das Intervall $[-10;10]$ zugrunde gelegt.

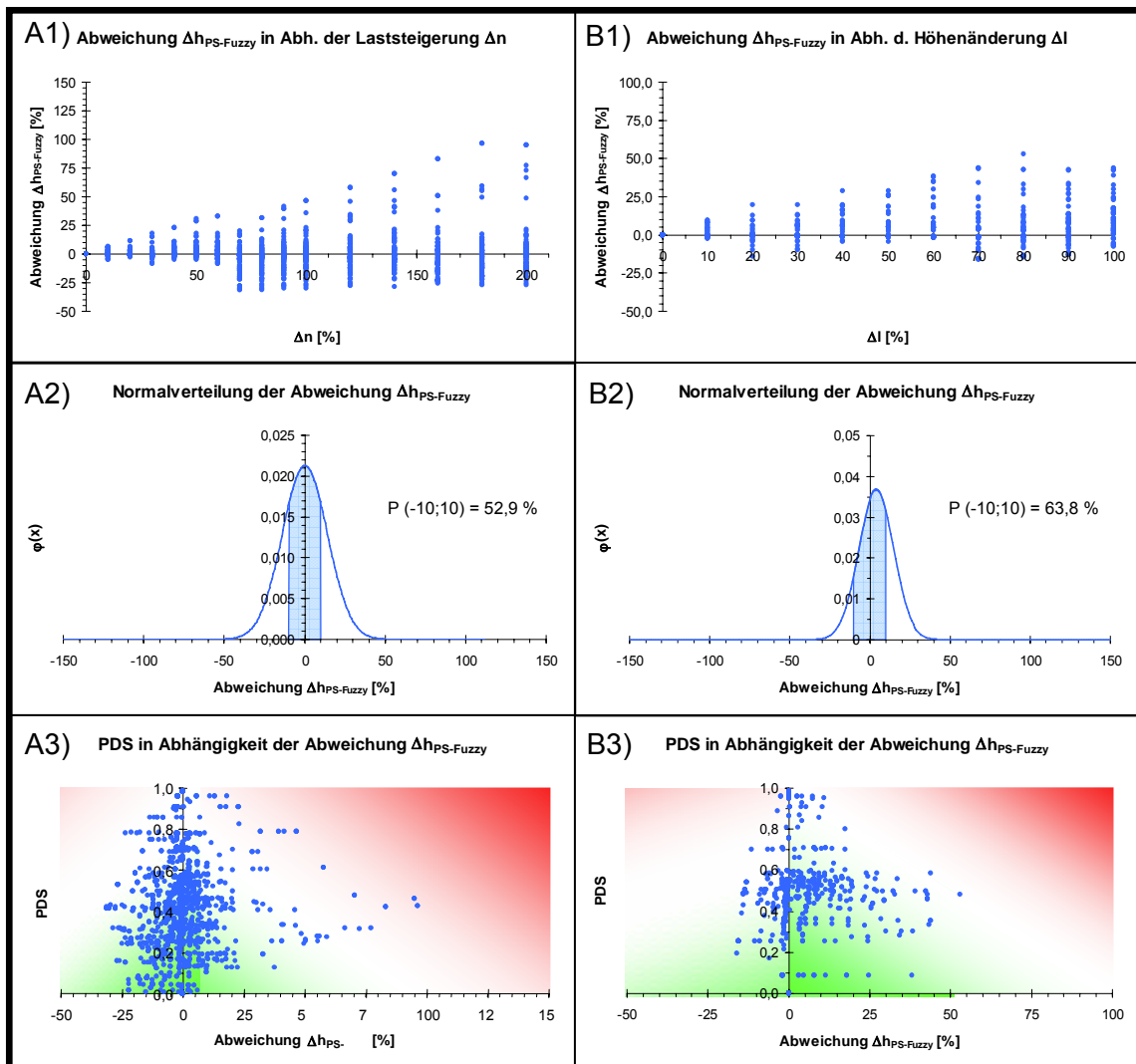


Abbildung 5.11: Graphische Auswertung der Abweichungen $\Delta h_{PS-Fuzzy}$ (1), Normalverteilung φ (2) und Spezifität PDS (3) in Abhängigkeit der Laststeigerung Δn_{Ed} (A) bzw. der Wanderhöhung (B) Δl_{col}

Die Diagramme A2 und B2 der Abbildung 5.11 zeigen den zu den Modifikationen zugehörigen Verlauf der Normalverteilung. Die Wahrscheinlichkeit P , dass infolge einer Wanderhöhung Δl_{col} der defuzzifizierte Wert um nicht mehr als $\pm 10\%$ vom Wert der Parameterstudie abweicht, beträgt demnach $63,8\%$. Die geringere Wahrscheinlichkeit $P = 52,9\%$ im Fall einer Laststeigerung Δn_{Ed} (siehe Diagramm B2) resultiert u. a. auch aus dem größeren Varianzbereich der

Änderungsgröße Δn_{Ed} (0 bis 200 % - gegenüber 0 bis 100 % bei Δl_{col}). Die Verbreiterung der Gauß'schen Normalfunktion repräsentiert dabei die mit zunehmender Laststeigerung Δn_{Ed} steigende Unschärfe im Änderungsbereich bis zu 200 %.

Die Ergebnisse der Querschnittsverbreiterung der Parameterstudie erfolgen vereinfachend in praxisüblichen Iterationsschritten von $\Delta h = 2$ cm. Dies stellt ein zusätzliches Abweichungspotential gegenüber dem „fließenden“ Verlauf des aus dem Fuzzy-Modell defuzzifizierten Wertes dar. Infolge der Proportionalitäten macht sich dieser Sachverhalt in den Bereichen einer geringeren Querschnittsverbreiterung besonders bemerkbar. Somit stellen die unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen mittels des intuitiv erstellten Fuzzy-Modells approximierten Ergebnisse eine sehr gute Näherung gegenüber der deterministischen Auswertung dar.

Die Diagramme A3 und B3 der Abbildung 5.11 zeigen die mit Hilfe des *PDS* evaluierte *Spezifität* der akkumulierten Fuzzy-Ergebnismenge in Abhängigkeit der prozentualen Abweichung der Querschnittsverbreiterung $\Delta h_{PS-Fuzzy}$ aus Parameterstudie und Fuzzy-Modell. Ideale Werte befinden sich im hell hinterlegten Bereich der Diagramme A3 und B3. Dabei wird eine hohe *Spezifität* bei geringer Abweichung $\Delta h_{PS-Fuzzy}$ angestrebt. Umgekehrt muss die *Spezifität* mit steigender Abweichung $\Delta h_{PS-Fuzzy}$ abfallen. In den Diagrammen A3 und B3 sind Konzentrationen der Werte im Bereich $PDS = 0,5$ bei gleichzeitig geringer Abweichung $\Delta h_{PS-Fuzzy}$ zu erkennen. Daraus kann gefolgert werden, dass das erarbeitete Fuzzy-Modell auch bei nur geringer (subjektiver) *Spezifität* – also z. B. einer nur geringen Ausprägung des maximalen Zugehörigkeitsgrades – adäquate Näherungen approximiert. Eine „Anhebung“ der resultierenden *PDS*-Werte durch eine Erhöhung des Wurzelexponenten beim Radikanten PDS_I (siehe Formel 5.5) wird aufgrund der Gefahr einer zu stark ansteigenden *Spezifität* bei gleichzeitiger Vergrößerung der Abweichung $\Delta h_{PS-Fuzzy}$ für nicht sinnvoll erachtet.

Um die Qualität des Fuzzy-Modells auch im Fall kombinierter Modifikationen (hier: Laststeigerung Δn_{Ed} und Wanderhöhung Δl_{col}) zu evaluieren, wurden ebenfalls die mittels Fuzzy-Modell approximierten Werte mit der Parameterstudie verglichen.

Für eine bessere Übersicht werden die Ergebnisse aus der Vergleichsanalyse infolge Laststeigerung Δn_{Ed} und Wanderhöhung Δl_{col} mit Hilfe der Standardabweichung σ in Abhängigkeit der Modifikationsgröße in einem räumlichen Diagramm dargestellt (siehe Abbildung 5.12C).

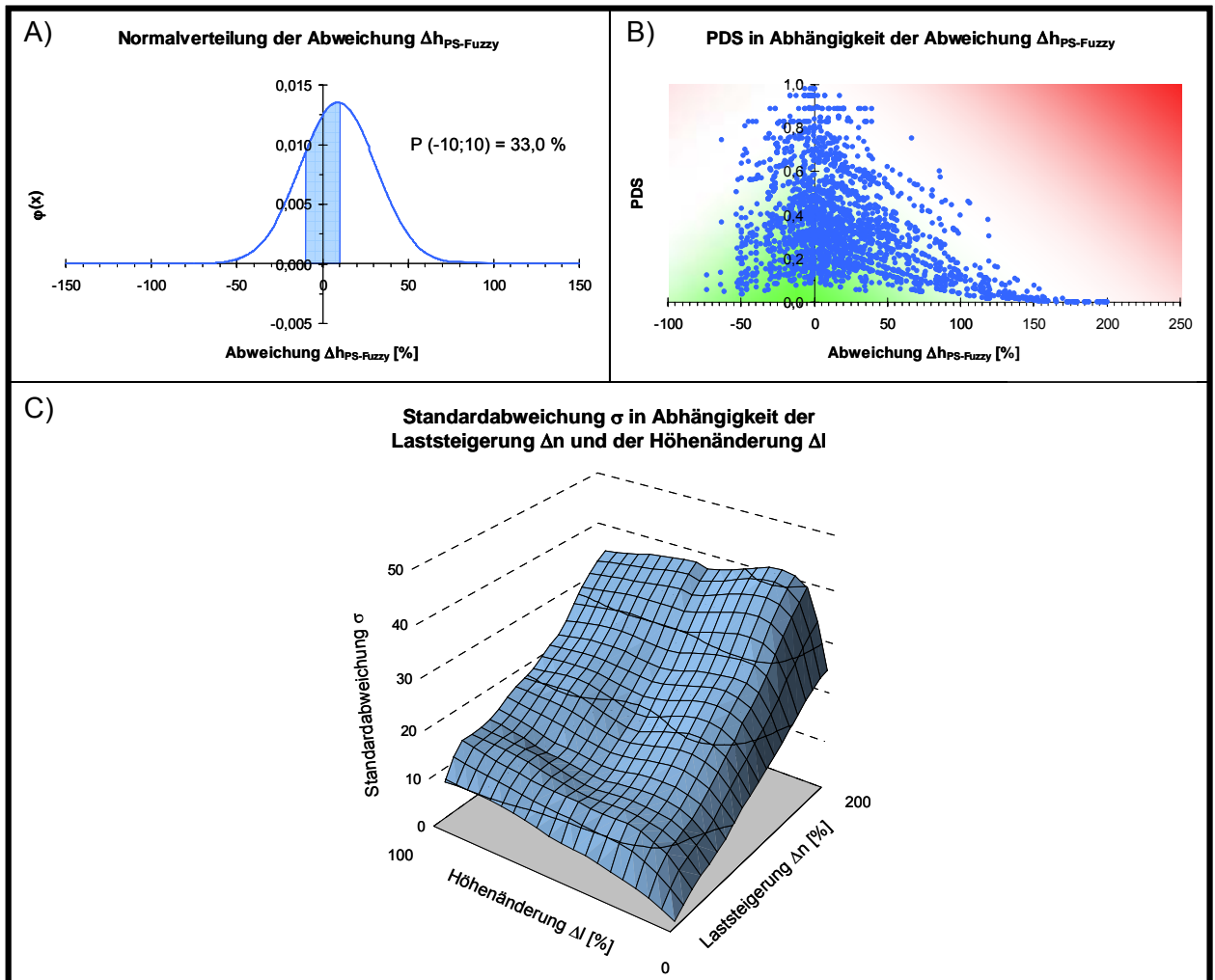


Abbildung 5.12: Graphische Auswertung der Normalverteilung ϕ (A), Spezifität PDS (B) und Standardabweichung σ (C) in Abhängigkeit kombinierter Modifikation der Laststeigerung Δn_{Ed} und Wanderhöhung Δl_{col}

Erwartungsgemäß steigt die Standardabweichung σ mit zunehmender Modifikationsgröße an. In Bereichen mit bis zu 50-prozentiger Änderung von Last und Wandhöhe wird eine Standardabweichung von ca. 10 % erreicht. In Anbetracht der Randbedingungen (Iterationsgenauigkeit, Proportionalität) stellen die Ergebnisse aus dem intuitiv erstellten Fuzzy-Modell für die komplexe Aufgabenstellung

kombinierter Planungsänderungen eine ebenfalls adäquate Näherung zur deterministischen Nachweisführung dar.

Die größeren Abweichungen gegenüber einer singulären Änderung eines Planungsparameters repräsentiert auch der gedrungenere Verlauf der Gauß'schen Normalverteilung in Diagramm A. Die Wahrscheinlichkeit P , dass infolge einer kombinierten Modifikation aus Laststeigerung Δn_{Ed} und Wanderhöhung Δl_{col} sich der defuzzifizierte Wert – unter Zugrundelegung der Änderungsbereiche von 0 bis 100 % bzw. 0 bis 200 % – im Intervall $[-10; 10]$ befindet, beträgt demnach 33,0 %.

Der mit Hilfe des *PDS*-Faktors ermittelte Wert der Spezifität in Abhängigkeit der Abweichung $\Delta h_{PS-Fuzzy}$ (siehe Diagramm B) zeigt einen – zur singulären Veränderung von Planungsparametern äquivalenten – konservativen Verlauf auf.

5.2.4 Anmerkung zur Extrapolation und Optimierung der Fuzzy-Modelle

Bei den vorgestellten Ergebnissen der Vergleichsanalyse liegt dem Fuzzy-Modell für die Sensitivitätsanalyse zentrisch belasteter Stahlbetonwände eine a priori erstellte Regelbasis mit intuitiv definierten Fuzzy-Mengen zugrunde. Hierbei wurden alle – in Abhängigkeit der gewählten Planungsmodifikationen – möglichen Kombinationen aus Eingangsvariablen mit charakteristischen linguistischen Termen berücksichtigt. Aufgrund der unüberschaubar hohen Anzahl möglicher Kombinationen der Eingangsgrößen ist die Erstellung vollständiger Regelbasen in der Praxis mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Durch die Anwendung logischer Fuzzy-Modelle unter Berücksichtigung der konjunktiven Verknüpfung der einzelnen Regeln besteht die Möglichkeit von Aussagen auf der Grundlage einer reduzierten Regelbasis [DUP00]. Zur Verifikation wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten hierfür die vorhandene Regelbasis gezielt reduziert. Durch die Eliminierung von Regeln vor allem in dem – dem Ingenieur unsicheren – Bereich von Planungsänderungen mit großen Parameterveränderungen wurde die Verhaltensweise des erarbeiteten Modells untersucht. Im Gegensatz zur Vorgehensweise bei funktionalen Fuzzy-Modellen wird der Anwender bei jeglicher Kombination von Eingangsparametern in Abhängigkeit der *Spezifität* des Ergebnisses in seiner Entscheidung durch das Fuzzy-Modell unterstützt.

Erlangt der Experte aufgrund bearbeiteter Planungsänderungen weitere Erkenntnisse, so hat er die Möglichkeit, den Wertebereich der Variablen der Konklusion durch zusätzliche Regeln so zu restringieren, dass noch genauere Ergebnisse vom Fuzzy-Modell ermittelt werden. Um die Ergebnisse der dann zur Verfügung stehenden Datensätze möglichst exakt zu approximieren, bedürfen Fuzzy-Modelle nach dem ersten Entwurf einer Anpassung an die äquivalenten Beispieldaten mit zugehörigen Inferenzergebnissen. Wird eine solche Optimierung manuell vorgenommen, so ist dies üblicherweise sehr zeitintensiv und birgt die Gefahr fehlerhafter Formalisierung [ALT93]. Aus diesem Grund wurden in den vergangenen Jahren Methoden auf der Grundlage Neuronaler Netze bzw. Evolutionärer Algorithmen zur automatisierten Formalisierung und Optimierung von Fuzzy-Modellen entwickelt [HB+02]. Hybride Neuro-Fuzzy Ansätze verschmelzen hierbei Methoden Neuronaler Netze mit Fuzzy-Systemen meist dahingehend, dass ein neuronales Netz zur Bestimmung maßgebender Systemparameter eines Fuzzy-Systems verwendet wird [JAN93]. Nach Abschluss der Lernphase liegt – bei sorgfältiger Anpassung des Lernalgorithmus und Einhaltung semantischer Einschränkungen – ein eigenständiges, größtenteils interpretierbares Fuzzy-Modell vor [NAU96], [CIE03]. Neben hybriden Neuro-Fuzzy-Modellen eignen sich auch Evolutionäre Algorithmen [HOF01], [CH+01] für die Optimierung regelbasierter Systeme. So erfolgt beispielsweise in [FA+04] der Wissenserwerb mit Hilfe eines auf Genetischer Programmierung basierenden Data-Mining-Algorithmus (*Genetic Programming based Fuzzy-System – GPFS*). Diese Ansätze sehen jedoch lediglich die Optimierung klassischer regelbasierter, funktionaler Fuzzy-Modelle (z.B. MA-Modelle) ohne Berücksichtigung logischer Implikationsoperatoren vor [NAK99].

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde auf eine weitere Optimierung des Fuzzy-Modells für die Sensitivitätsanalyse infolge Planungsänderung zentrisch belasteter Stahlbetonwände verzichtet. Die mittels der a priori erstellten Regelbasis mit intuitiv definierten Fuzzy-Mengen approximierten Ergebnisse repräsentieren eine ausreichend präzise Näherung zum Resultat aus deterministischen Nachweisprozessen.

KAPITEL 6

IMPLEMENTIERUNG UND ANWENDUNG DES MORLA-MODELLS

Zur Evaluierung sowie als Beleg der Eignung der erarbeiteten Konzepte und Modelle wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Softwareapplikation mit der Bezeichnung *Domain Augmented Environment for Intelligent Networked & Cooperative Design* (*DaVinci*) prototypisch entwickelt. Zusammen mit einer Wissenserwerbskomponente mit der Bezeichnung *Knowledge Base Definition Tool* (*KBDT*) bilden diese beiden Softwareapplikationen die Umgebung des *MORLA-Modells* für eine wissensbasierte Modellierung vernetzt-kooperativer Planungsprozesse im Rahmen der Nachweisführung.

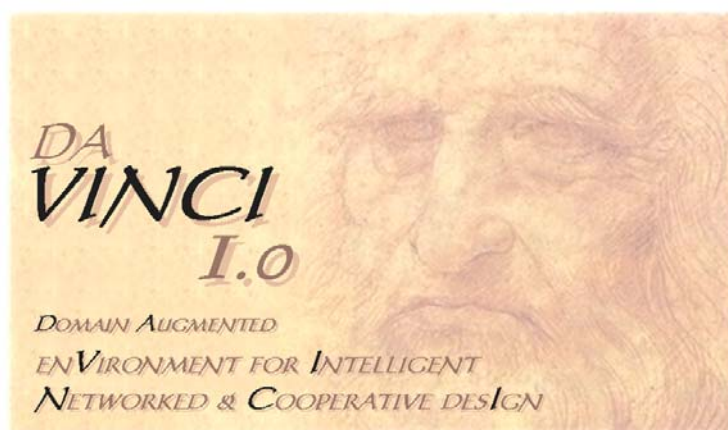


Abbildung 6.1: Info-Dialog der entwickelten Softwareapplikation *DaVinci*

6.1 Entwicklung von Softwareapplikationen

Die Applikation *DaVinci* dient zur domänenübergreifenden und netzwerkbasierten, kooperativen Definition, Editierung, Visualisierung und Auswertung digitaler *Gebäude-Informationen-Modelle*. *DaVinci* ist sowohl als Einzelapplikation, als auch im Client- / Serverbetrieb lauffähig. In letzterem Fall ist dieselbe Applikation gleichermaßen im Servermodus als auch als Client verwendbar. Im Folgenden wird ausgehend von dieser Konstellation in *Server* und *Clients* unterschieden, wobei die Applikation im *Standalone Modus* diese beiden Komponenten gleichwertig integriert.

Mit Hilfe der in den Clients integrierten Dialogkomponente können die räumlich verteilt angeordneten Projektbeteiligten Instanzen des *BIM* definieren, editieren und visualisieren. Innerhalb der zentralen Planungsapplikation von *DaVinci-Server* werden der Daten- und Informationsfluss, die gewerkeübergreifende Benutzerinteraktion sowie die erforderlichen Sperrmechanismen gesteuert und geregelt. Hierin beinhaltet ist auch die gewerkeübergreifende Inferenzkomponente, bei der die gewerkespezifischen *MORLA-Wissensbanken* auf das *BIM* angewendet und die Nachweise im Rahmen des Inferenzprozesses automatisiert geführt werden. Die in *DaVinci* integrierte Erklärungskomponente bildet die für wissensbasierte Systeme erforderliche Schnittstelle zum Anwender, in der mit Hilfe der gewerkeübergreifenden Abhängigkeitsverfolgung der Nachweisprozess nachvollzogen werden kann. Hierbei wird die Differenzierung privat geschützter und öffentlich zugänglicher Wissensrepräsentation berücksichtigt.

Mit Hilfe der Wissenserwerbskomponente *KBDT* können die gewerkespezifischen *MORLA-Wissensbanken* definiert sowie editiert werden. Die hiermit formalisierten Instanzen der BE's werden auf den zugehörigen Klassenebenen des *PDM* abgelegt. Hierfür wird neben der Struktur des *KDM* auch das domänenspezifische Schema des *PDM* benötigt, welches durch ein spezielles Metaformat zwischen den Applikationen *DaVinci* und *KBDT* ausgetauscht wird. Da theoretisch mehrere unterschiedliche *PDM* koexistieren können, wird bei Instanziierung einer neuen Wissensbank im *KBDT* die Assoziation mit einem *PDM*-Schema erforderlich.

Abbildung 6.2 zeigt die grundlegende Architektur der realisierten Planungsumgebung des *MORLA-Modells* mit den prototypisch entwickelten

Applikationen *KBDT* und *DaVinci* unter Berücksichtigung der grundlegenden Modellstruktur und der Systemarchitektur in einer verteilten Umgebung.

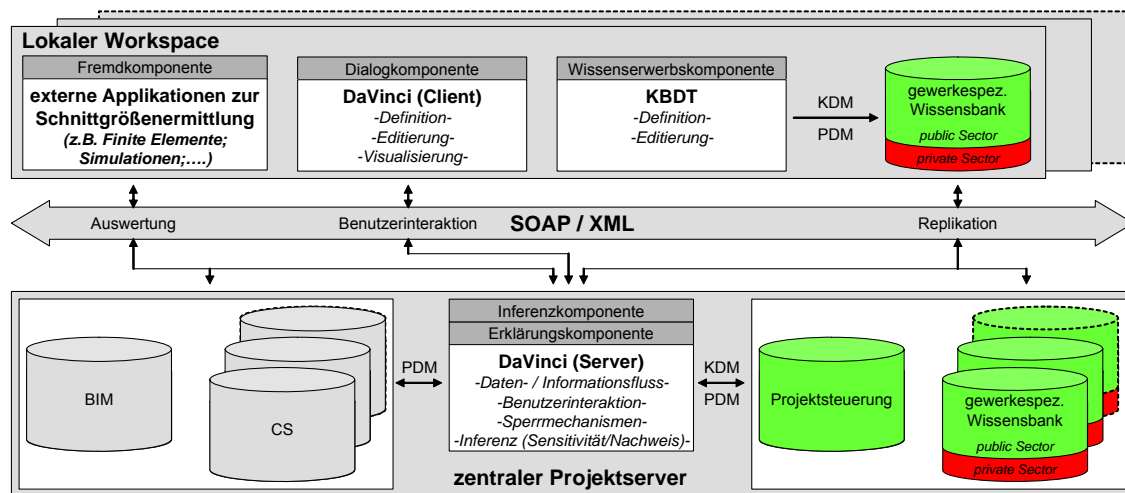


Abbildung 6.2: Architektur der auf dem MORLA-Modell basierenden verteilten Planungsumgebung

Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Anbindung von Fremdapplikationen an das hier erarbeitete System. Während des Inferenzprozesses werden diese dann ähnlich einem privaten Teil einer Wissensbank behandelt, so dass im Gesamtsystem nach wie vor ein vollständiges Änderungsmanagement ermöglicht wird. Die Qualität der Aussagekraft innerhalb des Änderungsmanagements hängt in diesem Fall jedoch stark von den Schnittstellen der angebundenen Applikation ab, so dass Änderungen an Parametern, die unter Umständen in Fremdapplikationen verwendet wurden, tendenziell pessimistische Auswirkungen auf die globale Auswirkungsverfolgung haben. Da die unscharfe Abschätzung von Konsequenzen infolge Planungsänderungen unabhängig von den zugehörigen, deterministischen Berechnungsvorschriften modelliert wird, kann somit auch bei der Anbindung von in sich „gekapselten“ Fremdapplikationen im Gesamtsystem ein vollständiges Änderungsmanagement ermöglicht werden.

Die Applikationen *DaVinci* und *KBDT* wurden unter Verwendung von *Microsoft Visual C++ .NET* [MVS03], [SHK02] implementiert. Die mittels des *KBDT* definierten gewerkespezifischen *MORLA-Wissensbanken* sowie das *Gebäude-Informationen-Modell* mit seinen zugehörigen Szenarien werden in relationalen Datenbanken persistent gespeichert. Das Mapping der objektorientierten Strukturen auf die relationalen Datenbank-Tabellen erfolgt mittels Link-Tabellen, in denen die

Relationen formalisiert werden [AMB00]. Über die standardisierte Datenbankschnittstelle *MySQL Connector ODBC* (Open **D**ata**B**ase **C**onnectivity – Version 3.5.1) greifen die entwickelten Applikationen auf die Datenbanken des frei zugänglichen SQL-Datenbankverwaltungssystem *MySQL* (Version 5.0 – Community Edition) zu. Zur Visualisierung des digitalen *BIM* wurden die *low-level API's* (Application **P**rogramming **I**nterfaces) von *DirectX* – Version 9.0c verwendet. Aus Gründen der Transparenz und der Plattformunabhängigkeit wurde die Client-Server-Middleware SOAP als Kommunikations-Protokoll für die beschriebene Systemarchitektur gewählt [W3C--]. Dieses Protokoll verwendet rein XML-codierte Funktionsaufrufe und Parameterübergaben. Da die hierbei verwendeten Softwarekomponenten System-, Plattform-, Hersteller-, Betriebssystem- und Programmiersprachen-unabhängig sind, ist ein Höchstmaß an Kompatibilität gewährleistet. Weiterhin werden durch SOAP viele Sicherheitsprobleme umgangen, da Firewalls den HTTP Kanal grundsätzlich zur Verfügung stellen und somit keine zusätzlichen Ports erforderlich sind, welche die Systemsicherheit gefährden. Ebenso kann der Zugriff über Proxy-Server erfolgen.

Im Rahmen der Anwendung des *MORLA-Modells* fallen enorme Datenmengen an. Zur Vermeidung langer Wartezeiten während der Übertragung dieser Informationen wurde angestrebt, den Datentransfer auf ein Minimum zu reduzieren. So werden zu Beginn eines jeden Projektes alle gewerkespezifischen *MORLA-Wissensbanken* der beteiligten Fachplaner vollständig auf den Projektserver repliziert und für die Auswertung im Rahmen der Inferenz serverseitig vorgehalten. Änderungen in den *MORLA-Wissensbanken*, welche durch die Fachplaner in ihren lokalen Workspaces vorgenommen wurden, werden mit Hilfe eines selektiven Replikationsmechanismus auf die zentral vorliegenden Wissensbanken übertragen. Für die Visualisierung des *BIM* bzw. der verschiedenen zu bearbeitenden *Szenarien* werden lediglich die erforderlichen Geometrieattribute mit Angabe der zu den PDM-Instanzen zugehörigen Nachweis- und Sensitivitätsstadien temporär in die *DaVinci-Client*-Versionen der verteilt angeordneten Projektbeteiligten geladen. Sämtliche Vorgänge der Editierung erfolgen auf dem serverseitigen Gebäude-Informations-Modell und werden in den lokalen Workspaces lediglich visualisiert. Am Beispiel der Editierung einer Instanz der BE-Klasse *Benutzereingabe* soll der Vorgang in der verteilten Planungsumgebung des *MORLA-Modells* erläutert werden (siehe Abbildung 6.3).

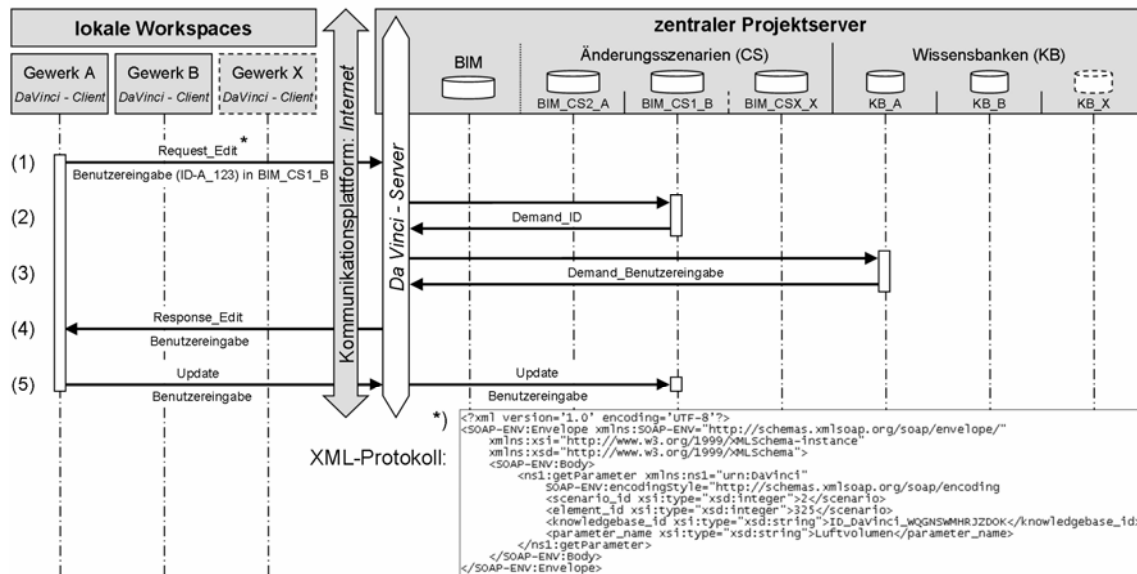


Abbildung 6.3: Sequenzdiagramm der Editierung eines Berechnungselementes der Klasse *Benutzereingabe* in einer verteilten Planungsumgebung des MORLA-Modells

Aufgrund eines nicht erfüllten Nachweises möchte der Fachplaner des Gewerkes A im Szenario BIM_CS1_B die Instanz der BE-Klasse *Benutzereingabe* mit der ID-A_123 editieren. Hierfür wird von der *DaVinci*-Client-Version eine Anfrage an *DaVinci*-Server gesendet (1). Dieser liest die erforderlichen Daten im Szenario BIM_CS1_B aus der betreffenden PDM-Instanz, in welcher der bisherige Wert des Berechnungselementes abgelegt ist aus (2). Die spezifizierte PDM-Instanz enthält in ihrer Liste abgelegter Parameter für den betrachteten Wert des Berechnungselementes die zugehörigen Identifikatoren (ID's) der gewerkespezifischen MORLA-Wissensbank sowie des zugehörigen Berechnungselementes. Somit kann auf das zugehörige BE *Benutzereingabe* in der entsprechenden Wissensbank (hier: **K**nowledge **B**ase – KB_A) zugegriffen werden (3). Die erforderlichen Informationen (BE mit spezifiziertem Wert) können somit an den anfragenden Client übertragen werden (4). Nach Editierung des Wertes durch den Client wird dieser in das zugehörige Szenario BIM_CS1_B übertragen und abgelegt (5). Analog hierzu verläuft der Prozess des Zugriffs auf die – für die Erklärungskomponente erforderlichen – HTML-Seiten zur Rückverfolgung der Nachweisführung. Diese werden ebenfalls erst zum Zeitpunkt des Aufrufs vom Client am Server abgefragt.

Die beschriebene Vorgehensweise kann mit einer klassischen Dreischichtenarchitektur (Three-Tier-Applikation) verglichen werden [BMT02]:

- | | | |
|---|---|--------|
| 1. Schicht: Datenhaltung | } | Server |
| 2. Schicht: Datenverarbeitung / Business-Schicht | | |
| 3. Schicht: Frontend / Visualisierung & Benutzerinteraktion | } | Client |

6.2 Anwendung - KBDT

Die Definition und Editierung gewerkespezifischer MORLA-Wissensbanken erfolgt mit Hilfe der Wissenserwerbskomponente *KBDT*. Aufgrund der domänenübergreifenden Anwendbarkeit der Wissenserwerbskomponente *KBDT* muss vom Benutzer zu Beginn der Definition einer *MORLA-Wissensbank* die gewünschte Domäne (PDM-Struktur) gewählt werden. Das im Rahmen eines jeden *DaVinci*-Update mit übertragene und in den lokalen Workspaces der Fachplaner abgelegte Schema des *PDM* wird sodann als serialisierte Metadatei im *KBDT* eingelesen. Diese Metadatei enthält die PDM-Klassen mit deren hierarchischer Zuordnung, deren verankerter Methoden (Verwendung als *PDM-Zugriff*), sowie den elementspezifischen Symbolen zur interaktiven Darstellung im *KBDT*. Die eingelesene PDM-Struktur kann im PDM-Fenster ersehen werden (siehe Abbildung 6.4a). Des Weiteren wird im KDM-Fenster die KDM-Struktur mit den zur Verfügung stehenden Berechnungselementklassen visualisiert (6.4b). Die auf den zugehörigen PDM-Ebenen abgelegten Instanzen der Berechnungselemente können im Wissensbank-Fenster ersehen werden (6.4c - hier: „alle KDM-Elemente“ auf „allen PDM-Ebenen“). Zusätzlich muss der Anwender zu Beginn die erforderlichen Beschreibungstexte für die *MORLA-Wissensbank* vorgeben (6.4d). Der Wissensbank wird vom System automatisiert eine Unique-ID vergeben (siehe Abbildung 6.4d - unten). Diese ID ist für die eindeutige server- und projektübergreifende Identifizierung der Wissensbank erforderlich.

visualisiert die graphische Auswertung der formalisierten logischen Fuzzy-Modelle für spezifizierte Eingangsparameter. Neben der Darstellung der Fuzzy-Ergebnismenge werden der mittels *NMTCOG*-Verfahren defuzzifizierte Wert sowie der Wert der *Spezifität* der Ergebnismenge ausgegeben.

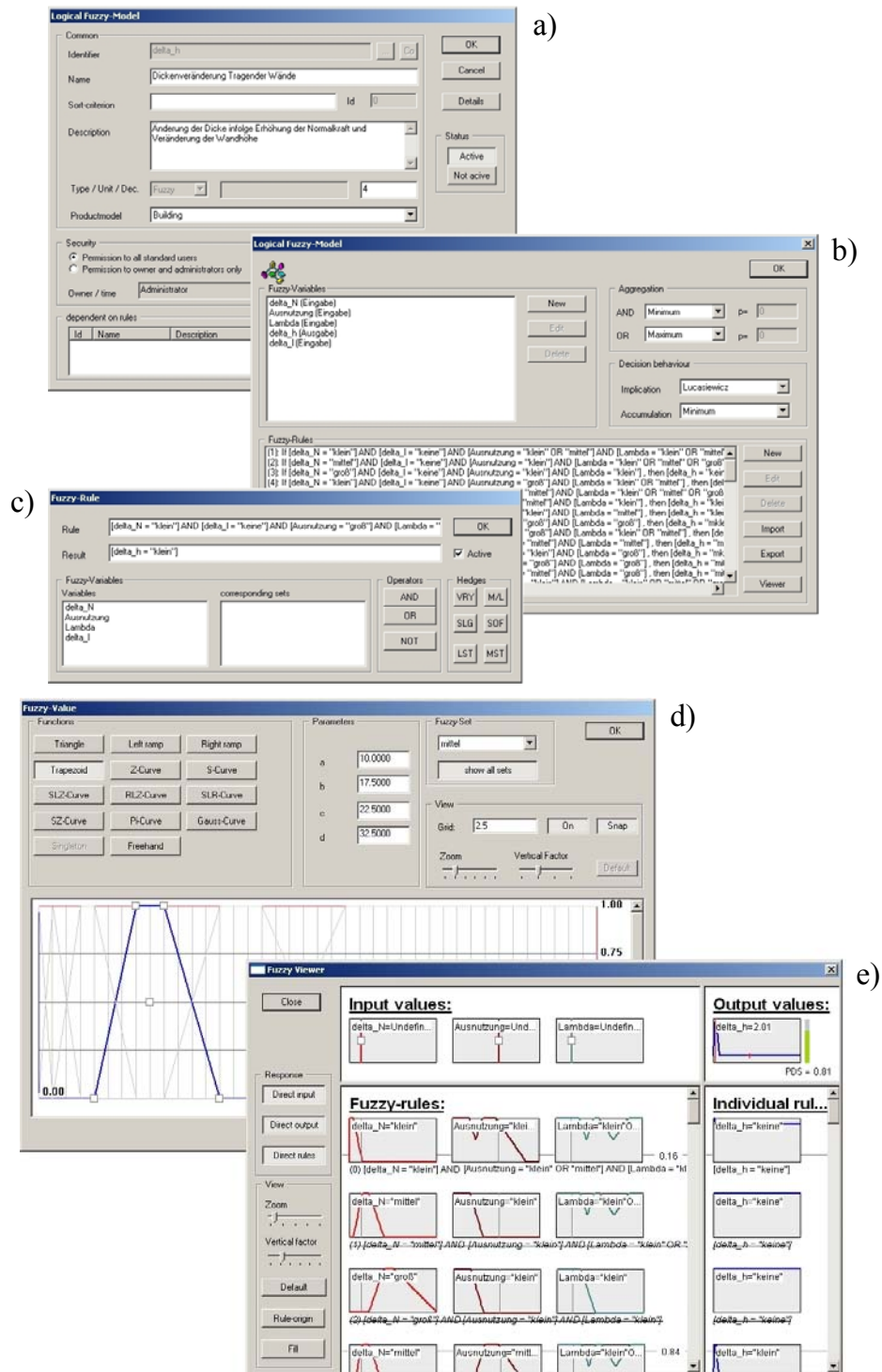


Abbildung 6.5: Dialoge zur Definition und Editierung logischer Fuzzy-Modelle

Die Formalisierung des erweiterten *PDM-Zugriffs* auf gleicher bzw. gleichberechtigter PDM-Klassenebene zur Realisierung von Netzstrukturen wird im Folgenden am Beispiel eines Auszuges eines raumlufttechnischen Kanalnetzes veranschaulicht.

Abbildung 6.6 stellt die in einem *Gebäude-Informationen-Modell* digitalisierten Bestandteile (Rohrleitungen, Formstücke, Bauteile und Querschnittsprofile) eines einfachen Kanalnetzes und die entsprechenden Bezeichnungen exemplarisch dar. Aus der beigefügten Legende sind die Gruppen gleichwertiger Elementklassen zu entnehmen. Bestandteile einer Gruppe gehören hierbei der gleichen PDM-Klasse an.

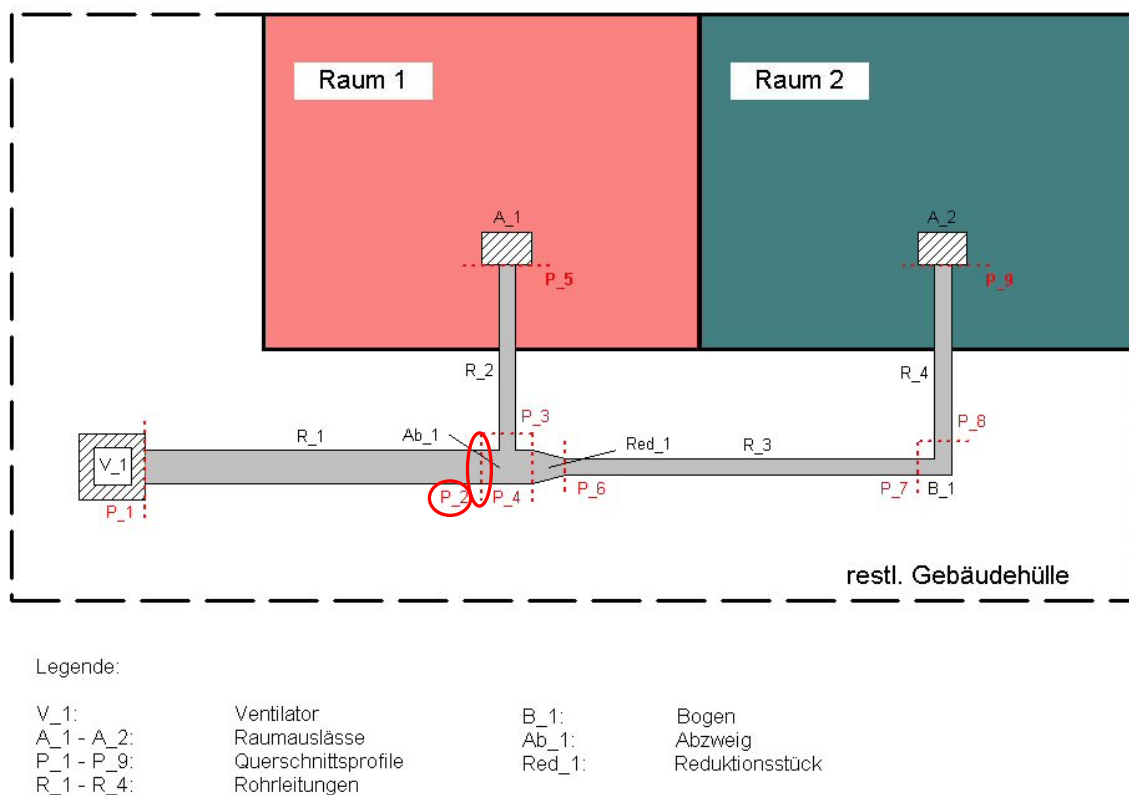


Abbildung 6.6: Digitalisierte Bestandteile eines exemplarischen Kanalnetzes

Für den Nachweis der Dimensionierung des Querschnitts (Profil) P₂ wird der an dieser Stelle im Kanalnetz aufsummierte Volumenstrom benötigt. Anschaulich leicht nachvollziehbar setzt sich dieser aus den benötigten Einzelvolumina der beiden dargestellten Räume zusammen, so dass die rückwärts verkettete Aufsummierung bis hin zu den entsprechenden Auslässen (A₁ und A₂) fortgeführt werden muss. Die Verkettung ist in Tabelle 6.1 veranschaulicht.

Tabelle 6.1: Verkettung von Kanalelementen

betrachtete(s) Stelle / Element im Kanalnetz	Elementklasse	nachfolgende(s) Element(e) im Kanalnetz	Elementklasse
P_2	HVAC_Profile	Ab_1	HVAC_Junction
Ab_1	HVAC_Junction	P_3; P_4	HVAC_Profile
P_3	HVAC_Profile	R_2	HVAC_Pipe
R_2	HVAC_Pipe	P_5	HVAC_Profile
P_5	HVAC_Profile	A_1	HVAC_Exhaust
A_1	HVAC_Exhaust	Raum 1	Room
P_4	HVAC_Profile	Red_1	HVAC_Pipe
Red_1	HVAC_Pipe	P_6	HVAC_Profile
P_6	HVAC_Profile	R_3	HVAC_Pipe
R_3	HVAC_Pipe	P_7	HVAC_Profile
P_7	HVAC_Profile	B_1	HVAC_Edge
B_1	HVAC_Edge	P_8	HVAC_Profile
P_8	HVAC_Profile	R_4	HVAC_Pipe
R_4	HVAC_Pipe	P_9	HVAC_Profile
P_9	HVAC_Profile	A_2	HVAC_Exhaust
A_2	HVAC_Exhaust	Raum 2	Room

Der betrachtete Kanalabschnitt setzt sich somit aus den PDM-Elementklassen „HVAC_Profile“, „HVAC_Pipe“, „HVAC_Edge“, „HVAC_Junction“ sowie „HVAC_Exhaust“ zusammen. Deutlich zu erkennen sind dabei die mehrfach vorkommenden gleichwertigen Instanzen der PDM-Klassen „HVAC_Profile“ und „HVAC_Pipe“ auf die im Rahmen der Aufsummierung zugegriffen werden muss. Für die genannten Elementklassen müssen daher zunächst die erforderlichen Berechnungselemente der Klasse *PDM-Zugriff* mit Hilfe der erweiterten verankerten Methoden der *MORLA-Wissensbank* des Gewerkes „Haustechnik“ wie folgt definiert werden (siehe Tabelle 6.2 und Abbildung 6.7):

Tabelle 6.2: Übersicht erforderlicher *PDM-Zugriffe*

Elementklasse	Berechnungselement / Name	Beschreibung	Definition
HVAC_Profile	PDM-Zugriff: Ausgangelement	Ermittlung der ID des nachfolgenden Bauteils	Methode: ELEMENT_EX
HVAC_Pipes	PDM-Zugriff: Ausgangelement	Ermittlung der ID des nachfolgenden Querschnittprofils	Methode: PROFILE_EX
HVAC_Junction	PDM-Zugriff: Ausgangelement_1	Ermittlung der ID des 1. nachfolgenden Querschnittprofils	Methode: PROFILE_EX1
HVAC_Junction	PDM-Zugriff: Ausgangelement_2	Ermittlung der ID des 2. nachfolgenden Querschnittprofils	Methode: PROFILE_EX2
HVAC_Exhaust	PDM-Zugriff: Ausgangelement	Ermittlung der ID des zugeordneten Raumes	Methode: ROOM

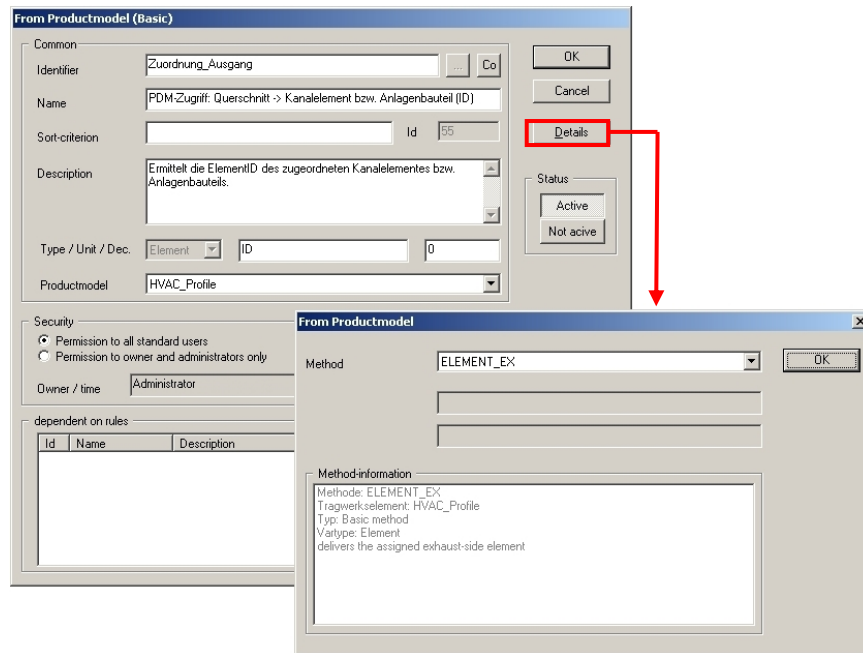


Abbildung 6.7: Dialog zur Formalisierung verankerter Methoden
in der Berechnungselementklasse *PDM-Zugriff*
(hier: *PDM-Zugriff* von RLT-Querschnitt auf Kanalelement)

Um die Übergabe des maßgebenden Volumenstroms rückwärts verkettet über das gesamte Kanalnetz automatisiert auszuführen, ist es notwendig, dass die Formelausdrücke auf Werte vorangegangener oder folgender Elemente verweisen (siehe Abbildung 6.8). Zur Ermittlung von Werten in „fremden“ Elementen wird dort jeweils ein eigenständiger Inferenzprozess initiiert. Dadurch ist sichergestellt, dass jeder Inferenzprozess für sich nur Werte im „eigenen“ Element berechnet. Da die Elementklasse des Folgeelements innerhalb des Kanalnetzes variieren kann (z. B. folgt nicht immer auf ein Querschnittsprofil ein Bogen), müssen über den Ausdruck jedoch alle möglichen Klassentypen angesprochen werden können (siehe Tabelle 6.3).

Tabelle 6.3: Übersicht erforderlicher *Formeln*

Elementklasse	Berechnungselement / Name	Beschreibung	Definition
HVAC_Element	Formel: Luftvolumen	Ermittlung des summierten Volumens	Formelausdruck: [Ausgangselement.Luftvolumen]
HVAC_Junction	Formel: Luftvolumen	Ermittlung des summierten Volumens	Formelausdruck: [Ausgangselement_1.Luftvolumen] + [Ausgangselement_2.Luftvolumen]
Room	Formel: Luftvolumen	Ermittlung des im Raum benötigten Volumens	Formelausdruck: [Volumen]

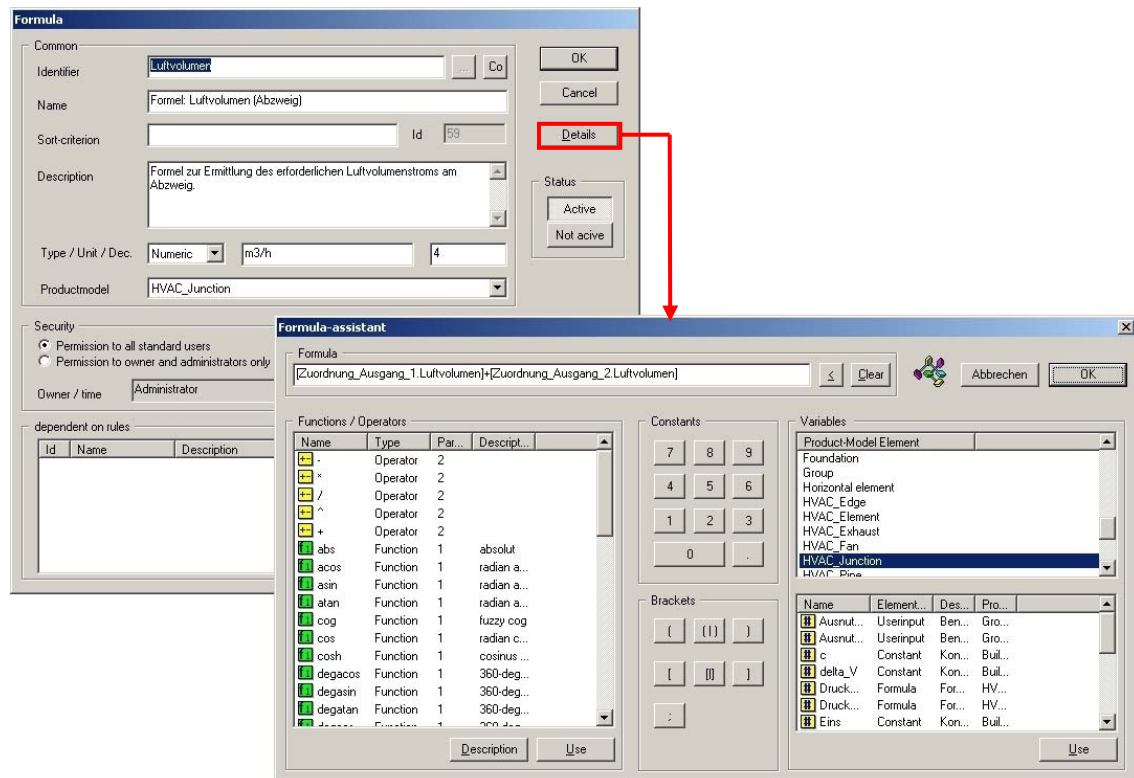


Abbildung 6.8: Dialog zur Formalisierung der Übergabe von Parametern in der Berechnungselementklasse *Formel* (hier: Aufsummierung zweier Eingangsluftvolumen)

Beispielhaft wurden im Rahmen dieser Arbeit die *MORLA-Wissensbanken* für die Nachweisführung raumluftechnischer Anlagen-Komponenten (HVAC_AC), für die Bemessung von Stahlbetonelementen (SE_DIN1045-1) unter Berücksichtigung von Kollisionselementen der beiden Gewerken, sowie die zentral vorliegende öffentliche Projektsteuerungswissensbank (MORLA_PM) mit Hilfe des *KBDT* formalisiert. BE-Instanzen der *MORLA-Wissensbank* HVAC_AC sind im Anhang C exemplarisch aufgelistet.

6.3 Anwendung – DaVinci

Definition, Editierung, Visualisierung und Auswertung digitaler *Gebäude-Informationen-Modelle* erfolgen im *MORLA-Modell* mit Hilfe der *DaVinci*-Applikation. Abbildung 6.9 zeigt die Hauptbenutzeroberfläche der Client-Version.

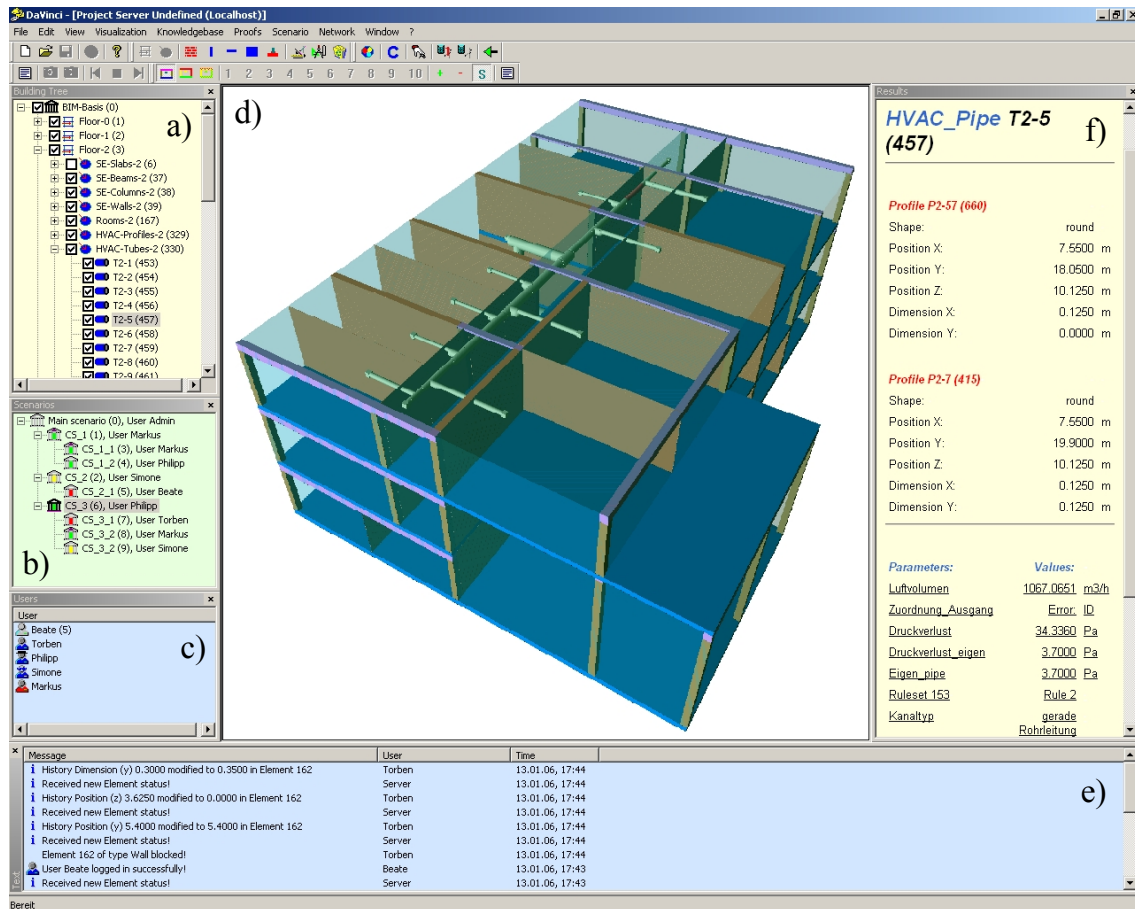


Abbildung 6.9: DaVinci-Hauptbenutzeroberfläche

Die Instanzen des serverseitig vorgehaltenen *BIM* werden im Fenster *Building-Tree* (6.9a) gemäß der PDM-Struktur dargestellt. Diese Darstellung bezieht sich auf das jeweils im Fenster *Scenarios* (6.9b) gewählte Szenario. In Abhängigkeit der Darstellungsform des BIM-Icons in (6.9b) können vom Anwender seine jeweiligen Berechtigungen in den Szenarien ersehen werden. Im Fenster *Users* (6.9c) kann der Anwender alle weiteren online befindlichen Projektbeteiligten inklusive derer jeweiligen Berechtigungen im spezifizierten Szenario bzw. derer aktuellen Szenariobearbeitung anhand der Darstellungsform des User-Icons ersehen. Im *Viewer* (6.9d) wird das *BIM* visualisiert. Dem Anwender stehen hierbei drei Ansichtsformen (normal, Nachweisstatus und Sensitivitätsstatus) zur Verfügung. Der Geometrieaufbau der PDM-Instanzen beruht dabei auf Systemachsen und –ebenen (siehe Abbildung 6.10a), deren extrudierte Volumenkörper (6.10b) auf der Grundlage definierter Assoziationen zwischen den Instanzen mit Hilfe automatisierter Offsets überschnitten werden (6.10c).

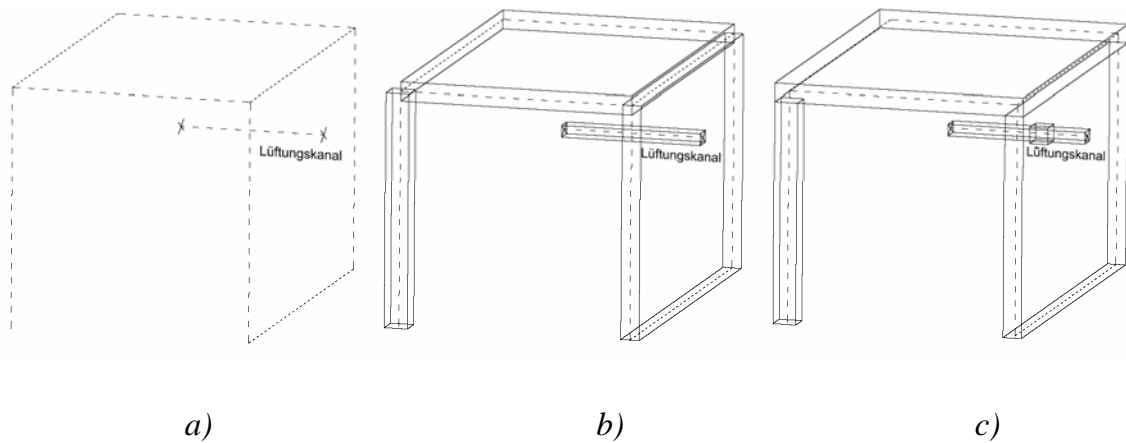


Abbildung 6.10: Geometrische Entwicklung eines *Gebäude-Information-Modells* (BIM)

Der gesamte Netzwerk-Traffic wird im *Message*-Fenster (6.9e) visualisiert. Die im Rahmen des Inferenzprozesses geführten Nachweise einschließlich ihrer verwendeten Parameter können in der HTML-Erklärungskomponente (6.9f) nachvollzogen werden. Mit Hilfe von Hypertext-Verweisen werden hierin für jedes Berechnungselement die zur Ermittlung seines Wertes verwendete Methode sowie die in dieser Methode verwendeten Werte dargestellt.

Die Anwendung der *DaVinci*-Applikation soll im Folgenden mit Hilfe eines Beispielszenarios erläutert werden.

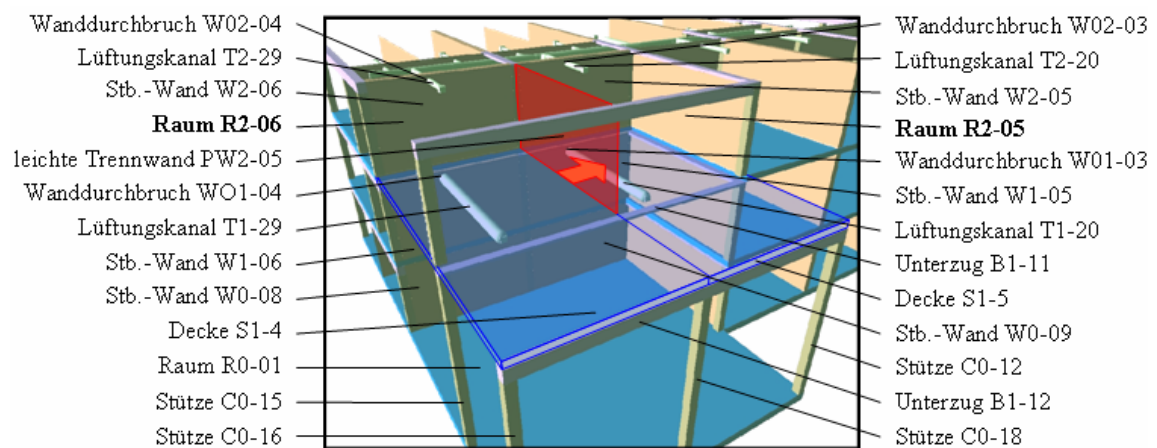


Abbildung 6.11: Beispielszenario – *Viewer*-Darstellung mit PDM-Instanzen

Der Büroraum R2-06 soll vergrößert werden und das bisherige Büro im unmittelbar daneben befindlichen Raum R2-05 zu einem Archiv mit kleinerer Grundfläche modifiziert werden (siehe Abbildung 6.11).

Hierfür wird von einem Projektbeteiligten (Client A – z.B. Architekt) ein neues Szenario (BIM_CS1_A) vom abgestimmten *BIM* abgeleitet. Aufgrund der aus der modifizierten Nutzung im Raum R2-05 resultierenden Veränderung der Verkehrslast von bisher 2,0 kN/m² (Büronutzung) auf 5,0 kN/m² (Lager/Archiv) nimmt der Tragwerksplaner (Client B) ebenfalls am Szenario BIM_CS1_A teil. Hierfür erteilt der Initiator (Client A) dem Client B Lese- und Schreibrechte. Im Bearbeitungsszenario BIM_CS1_A verschiebt nun Client A die Lage der leichten Trennwand PW2-05 um 1,35 m. Hierbei handelt es sich um eine wechselseitige Bearbeitung der PDM-Instanzen. Infolge der Modifizierungsmaßnahmen an dieser PDM-Instanz durch Client A wird der Zugriff auf das gemeinsame Datenobjekt (hier: leichte Trennwand PW2-05) für alle weiteren Zugriffe ausgeschlossen. D.h., es besteht immer nur ein exklusiver Zugriff auf das gemeinsame Informationsobjekt zu jedem Zeitpunkt. Durch den gegenseitig ausschließenden Zugriff wird die Konsistenz der Daten gewährleistet. Abbildung 6.12 verdeutlicht die Funktionsweise des gegenseitig ausschließenden Zugriffs auf gemeinsame BIM-Daten.

Infolge der Modifizierung der PDM-Informationen der leichten Trennwand PW2-05, wird der Status auf *editiert* sowie der Zeitstempel auf das aktuelle Systemdatum gesetzt. Die modifizierten Daten werden vom Änderungskontrollmechanismus im *DaVinci*-Server identifiziert. Allen weiteren Projektbeteiligten im Szenario werden die Modifikationen signalisiert, die nach manueller Bestätigung im *Viewer* des Clients aktualisiert werden.

Das identische Vorgehen gilt für die Änderung des Berechnungselementwertes der Benutzereingabe „Nutzungsart“ (welche im Rahmen des Inferenzprozesses auf die Tabelle „Lastannahmen_Raumnutzung“ zugreift) im Raum R2-05 durch den Client B (Tragwerksplaner).

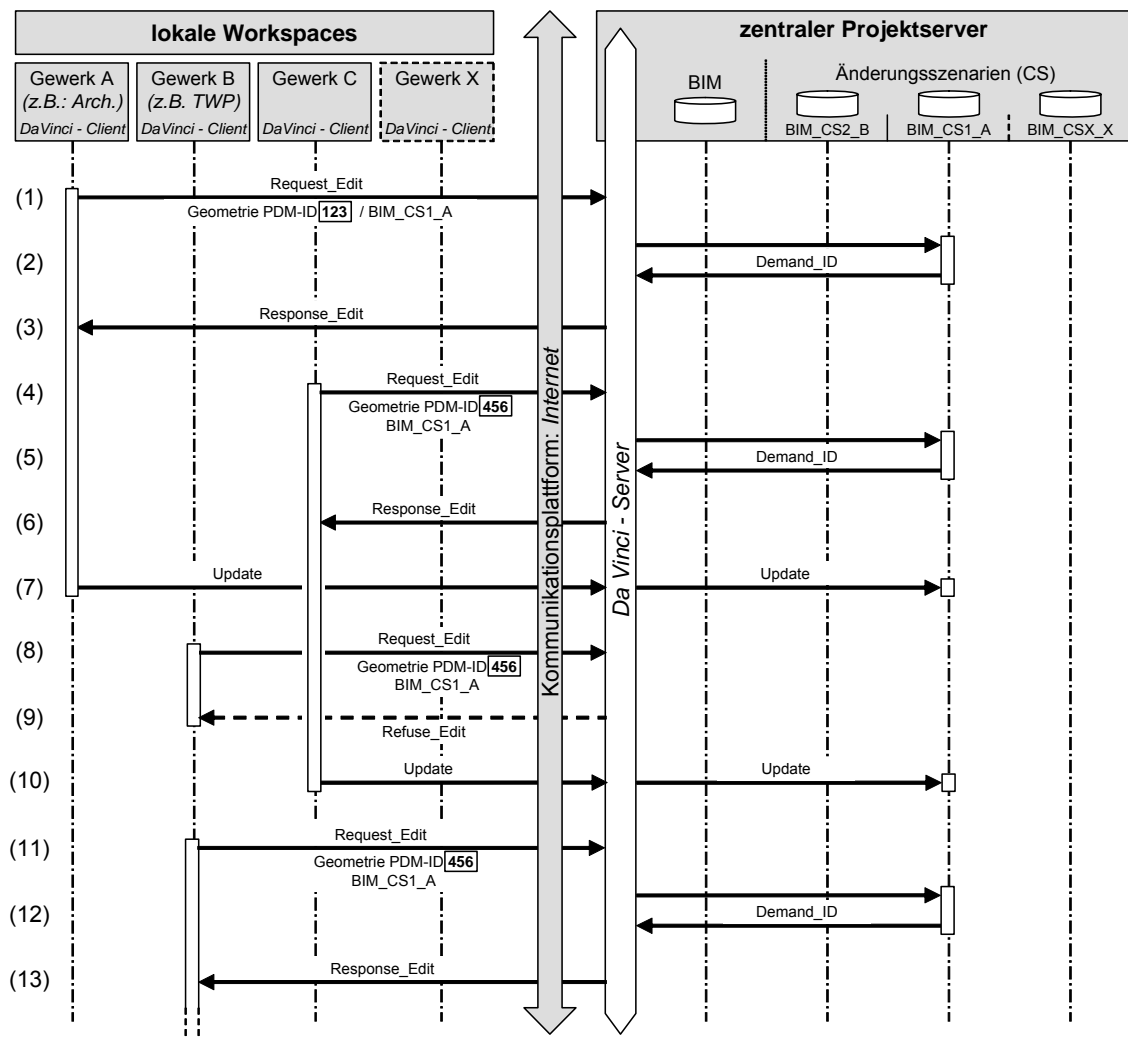


Abbildung 6.12: Darstellung der Funktionsweise des gegenseitig ausschließenden Zugriffs auf BIM-Daten

Durch die Modifikationen wird der Nachweisstatus einer Großzahl hiervon abhängiger Instanzen von Berechnungselementen und somit auch PDM-Instanzen auf den Nachweisstatus *unsicher* gesetzt. Von der Änderung der Raumvolumina sind u. a. auch Nachweise aus dem Gewerk der Haustechnik betroffen, deren Nachweisstatus ebenfalls auf *unsicher* gesetzt werden. Infolge des Abgleichs der hiervon betroffenen gewerkespezifischen MORLA-Wissensbank-ID der Haustechnik und den dazu korrespondierenden Benutzer-ID's mit den im Szenario BIM_CS1_A befindlichen Benutzer-ID's resultiert, dass ein Haustechnik-Fachplaner zur Auswertung der Konsequenzen hinzugezogen werden muss. Hierfür wird automatisiert eine Aufforderung zur Teilnahme am Szenario BIM_CS1_A an den betroffenen Fachplaner gesendet.

Die Veränderung des Nachweisstatus auf *unsicher* wird dem Anwender im *Viewer* (Layer: Nachweisstatus) durch die farbige Markierung (gelb \triangle unsicher) der betroffenen PDM-Instanzen visualisiert (siehe Abbildung 6.13b+c). Gleichzeitig werden die betroffenen PDM-Instanzen im Fenster *Building-Tree* dem Anwender kenntlich gemacht (siehe Abbildung 6.13a).

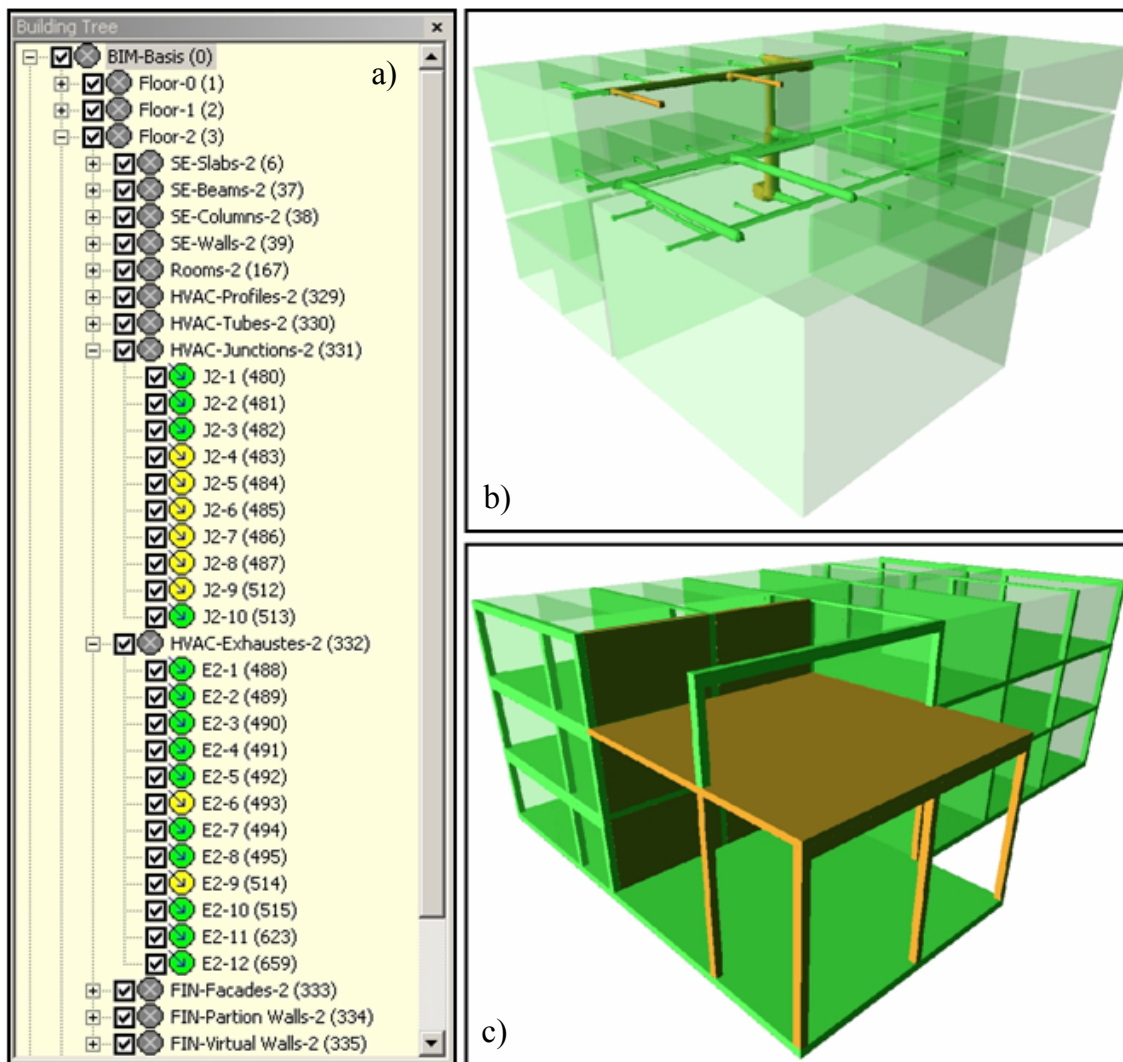


Abbildung 6.13: Darstellung der durch die Planungsmodifikation betroffenen PDM-Instanzen mit dem Status *unsicher* im *Building-Tree* (a) und im *Viewer* in der Ansicht „Nachweisführung“ für die Raumluftechnik (b) sowie für die Tragwerksplanung (c)

Trotz überschaubarer Modifizierungsmaßnahmen resultiert auch hier bereits eine sehr hohe Anzahl betroffener Instanzen. Unter Berücksichtigung einer eventuellen

Wandverbreiterung der lastabtragenden Stahlbetonwände (W2-05, W2-06, W1-05, W1-04, W0-08 und W0-09) und der damit verbundenen Änderung der angrenzenden und durch die Wände definierte Raumvolumina steigt die Anzahl abhängiger PDM-Instanzen (angeschlossene HVAC-Elemente, lastabtragende Decken, etc.) zusätzlich an. Die deterministisch verfolgten Abhängigkeiten führen somit schnell zu einer Unübersichtlichkeit für den Anwender und somit zum Verlust der Transparenz.

Der Initiator des Szenarios – der Architekt – entschließt sich nach Beendigung der Editierungsmaßnahmen in Abstimmung mit den weiteren Projektbeteiligten im Szenario CS_6 zum Start einer Sensitivitätsanalyse zwecks Approximation der Konsequenzen aus den getätigten Modifikationen. Hierfür wird die serverseitige *MORLA-Wissensbank* „Projektsteuerung“ auf das Szenario CS_6 angewendet. Dem Anwender steht dann die Möglichkeit zur Verfügung, einzelne als *unsicher* identifizierte PDM-Instanzen sukzessive zu selektieren oder diese in Ihrer Gesamtheit auszuwählen und auf eventuelle Konsequenzen mit Hilfe von *Sensitivitätsselektionen* hin zu verifizieren. Wie auch für den Inferenzprozess im Rahmen der Nachweisführung wird – ausgehend von den für die Auswertung der Fuzzy-Modelle benötigten Berechnungselemente – eine *rückwärtsgerichtete Inferenz* bzw. *Rückwärtsverkettung* gestartet. Abweichend von der Funktionsweise bei der Nachweisführung werden die vorhandenen Werte der Berechnungselemente nach der Auswertung nicht überschrieben, da diese die Grundlage für eine später eventuell geführte Inferenz der Nachweisführung bilden. Die im Rahmen der Sensitivitäts-Inferenz neu ermittelten Werte werden als zusätzliche Parameter temporär in den einzelnen Berechnungselementen abgelegt. Somit stehen für die veränderlichen Eingangsparameter der Fuzzy-Modelle (z.B. Δn_{Ed}) sowohl der alte, als auch der aktuelle Wert für die Auswertung zur Verfügung (z.B.: Formel ' $\Delta n_{Ed} = [1 - [n_{Ed_neu} / n_{Ed}]] \cdot 100$ ' für die prozentuale Laststeigerung einer Wandauflast).

Zusätzliche Definitionen von erforderlichen Benutzereingaben in der zentralen *MORLA-Wissensbank* „Projektsteuerung“ ist arbeitsintensiv und birgt die Gefahr von Inkonsistenzen. Durch den Einsatz von Instanzen der Klasse *Fremdzugriff* kann auf Werte in den angegliederten gewerkespezifischen *MORLA-Wissensbanken* der beteiligten Gewerke zugegriffen werden. Eine zusätzliche Definition wird somit vermieden und die Gefahr von Inkonsistenzen eliminiert. Die Ermittlung von PDM-

Daten – wie beispielsweise Geometrieattributen – erfolgt mittels Instanzen der Klasse *PDM-Zugriff*.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird zunächst mit Hilfe des *Sensitivitätsparameters* einer *Sensitivitätsselektion* der Grad der Veränderung bestimmt. Der daraus defuzzifizierte Wert wird – bezogen auf den Definitionsbereich der Ausgangsvariablen (z.B. Δb [%]) – normiert, so dass sich das Ergebnis in einem Wertebereich zwischen *eins* und *null* befindet. Auf der Grundlage des *Spezifitätsparameters* der *Sensitivitätsselektion* wird die Aussagekraft der Fuzzy-Ergebnismenge ermittelt (Wertebereich [0,1]).

Auf der Basis der Werte des *Sensitivitätsparameters* und des *Spezifitätsparameters* erfolgt die Visualisierung im *Viewer* (Layer: *Sensitivitätsanalyse*). Hierbei steuert der *Sensitivitätsparameter* die farbliche Darstellung (grün = 0,0 → keine Veränderung; rot = 1,0 → maximale Veränderung). Die Zuverlässigkeit des evaluierten Ergebnisses wird durch Variation der entsprechenden Bauteiltransparenz visualisiert. Sofern die Fuzzy-Ergebnismenge keine Aussagekraft beinhaltet (*Spezifitätsparameter* = 0,0) erfolgt die Darstellung mit 100-prozentiger Transparenz, d. h. es werden nur die Systemachsen der PDM-Instanzen visualisiert. Bei maximaler Aussagekraft (*Spezifitätsparameter* = 1,0) erfolgt die Darstellung der PDM-Instanz ohne jegliche Transparenz. Dadurch können gesicherte von ungesicherten Aussagen visuell unterschieden werden. Erfolgen mehrere *Sensitivitätsselektionen* innerhalb einer PDM-Instanz, so wird durch den maximalen *Sensitivitätsparameter* mit zugehörigem *Spezifitätsparameter* die Darstellungsform definiert. Abbildung 6.14 zeigt das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse im *Viewer* für das betrachtete Bespielszenario. Nur die von den Planungsmodifikationen als unsicher identifizierten PDM-Instanzen werden mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse ausgewertet. Abbildung 6.14 zeigt die unterschiedlichen Grade der Verbreiterungen der Stahlbetonwände als Konsequenz der Planungsänderung. Da für weitere PDM-Instanzen noch keine Sensitivitätsselektionen vorliegen – und somit keine Aussagen getätigt werden können (entspricht *Spezifitätsparameter* = 0) –, werden diese in Form von Systemachsen und –ebenen dargestellt (siehe betroffene Stützen, Balken und Decken).

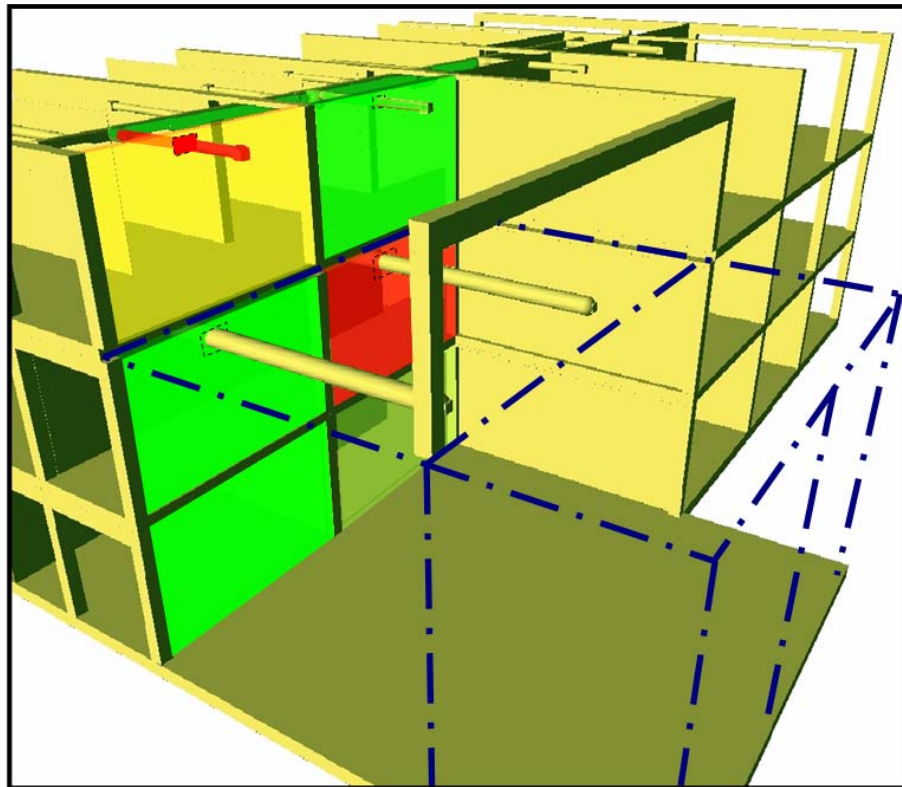


Abbildung 6.14: Darstellung der Ergebnisse aus der *Sensitivitätsanalyse* im Viewer in der Ansicht „Sensitivitätsanalyse“

Der Wert des *Sensitivitätsparameters* der einzelnen PDM-Instanzen wird an die parallel existierenden Szenarien übertragen. Dort erfolgt eine *informelle* Visualisierung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse aus dem Szenario CS_6 im Fenster *Building-Tree*.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse entscheiden sich die Planungsbeteiligten zur Nachweisführung. Beispielsweise startet hierfür der Tragwerksplaner (Client B) als erstes die hierfür erforderliche Inferenz aller betroffenen PDM-Instanzen aus dem Gewerk der Tragwerksplanung. Als Ergebnis der Nachweisführungen kann die *Erfülltheitsbedingung* der *Nachweiselektion* in der Stahlbetonwand W1-05 unter dem Archiv-Raum infolge höherer Belastung aus der Nutzungsänderung nicht eingehalten werden (→ Überschreitung des maximal zulässigen Bewehrungsgehaltes). Zusätzlich werden die Wanddurchbrüche WO2-04 und WO2-05 in den Stahlbetonwänden W2-06 und W2-05 in OG2 aufgrund der noch mit dem Nachweisstatus *unsicher* behafteten Lüftungskanalelemente T2-29

und T2-20 als *nicht erfüllt* ausgewertet. Die anschließende Auswertung der *MORLA-Wissensbank* der Haustechnik durch den zugehörigen Fachplaner ergibt lediglich eine nicht erfüllte Nachweisselektion der erforderlichen Querschnittsfläche im Lüftungskanalquerschnitt T2-29.

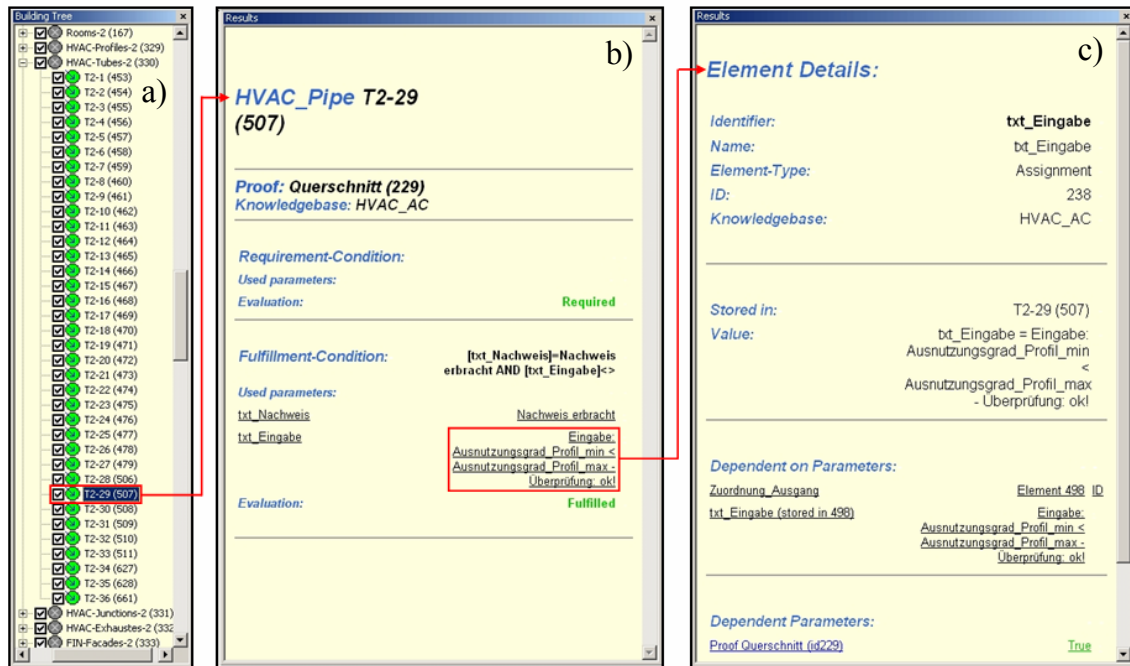


Abbildung 6.15: Darstellung der Ergebnisse aus der *Nachweisführung* im *Building-Tree* (a) und *Erklärungskomponente* (b+c)

Der Haustechniker verfolgt mit Hilfe der *Erklärungskomponente* den Rechenweg des fehlgeschlagenen Nachweises, wobei ihm als editierbare Berechnungselemente sowohl die beeinflussenden *Benutzereingaben*, als auch die *PDM-Zugriffe* als Änderungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Der Haustechniker entschließt sich zur Vergrößerung der zugehörigen Querschnittsfläche des Lüftungselementes T2-29 durch die Vergrößerung des Radius um 2,5 cm. Eine erneute Nachweisführung zeigt, dass nun alle Nachweise der Haustechnik den Status *erfüllt* aufweisen.

Nach Editierung der Wandbreite (Verbreiterung um 2 cm) der Wand W1-05 durch den Tragwerksplaner führt dieser die zuvor fehlgeschlagenen Nachweise erneut. Bis auf den Nachweis einer ausreichenden Öffnungsbreite im Wanddurchbruch WO2-04, der aufgrund der Vergrößerung des durchdringenden Lüftungskanals T2-29 nicht mehr erfüllt wird, werden alle Nachweisselektionen als

erfüllt ausgewertet. Nach Editierung der Breite der Durchbruchsöffnung (Verbreiterung um 5 cm) wird auch dieser Nachweis erfolgreich ausgewertet.

Aufgrund der erfolgreichen Auswertung aller Konsequenzen aus den Planungsmodifikationen entscheiden sich die beteiligten Projektplaner, das *BIM* (\triangleq Hauptszenario) mit den geänderten Berechnungselementen des Szenarios CS_6 durch den Initiator (Client A) zu überschreiben.

Aus Gründen der Konsistenzsicherung müssen die geänderten Berechnungselemente auch in den parallel existierenden Szenarien übernommen werden. Durch die projektspezifisch globale Definition der Identifikationsnummern sowie der lückenlosen Dokumentation aller Änderungen mit Hilfe der Historie sind sowohl alle Berechnungselemente als auch PDM-Elemente hierbei eindeutig referenzierbar.

KAPITEL 7

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

7.1 Zusammenfassung

Die gestiegenen Anforderungen an Planung und Ausführung von Bauprojekten erfordern für eine wirtschaftliche Projektabwicklung eine koordinierte Kommunikation sowie eine effiziente Informationsverarbeitung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit dem *Multi-Objective Representation of Knowledge and its Applications – Modell* (*MORLA-Modell*) die Grundlagen für vernetzt-kooperative Planungsprozesse unter Einsatz wissensbasierter Systeme erarbeitet und prototypisch implementiert. Das *MORLA-Modell* integriert weitreichende Aspekte der Mehrbenutzerfähigkeit, Datensicherheit, Modellintegrität und Anwendbarkeit auf sämtliche Gewerke des Bauwesens.

Die Vorteile des entwickelten Modells liegen in der beschleunigten Durchführung zeitintensiver und somit kostenverursachender Vorgänge durch eine effiziente Kommunikationsinfrastruktur sowie in der vollständigen Erfassung von sowohl gewerkespezifischen als auch gewerkeübergreifenden Konsequenzen einzelner Planungsaktivitäten innerhalb der verteilten heterogenen Planungsumgebung. Durch den konsequenten Einsatz eines derartigen Systems können die Fehleranfälligkeit minimiert und Planungs- und Entscheidungsprozesse erheblich beschleunigt werden.

Das *Gebäude-Informationen-Modell* (*Building-Information-Model – BIM*) als zentrale Datenbasis dient im *MORLA-Modell* zur Verwaltung der im Rahmen des Planungsprozesses erforderlichen Informationen. Sämtliche Produktdaten werden

zur Sicherstellung der Konsistenz ausnahmslos serverseitig vorgehalten und verwaltet. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Konsequenzen von Planungsänderungen sowie die Einhaltung lokaler Sperren jederzeit für alle Beteiligten ersichtlich sind. Um die erforderliche Mehrbenutzer- und Multigewerke-Fähigkeit von auf dem *MORLA-Modell* basierenden Systemen sicherzustellen, wurden im eigens hierfür erarbeiteten *Produkt-Daten-Modell* zudem wesentliche Elemente der Prozessmodellierung berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den Produktdateninstanzen werden die Instanzen der Wissensdaten – die *gewerkespezifischen MORLA-Wissensbanken* – auf den lokalen Workspaces der Projektbeteiligten vorgehalten. Die Verwendung einer deklarativen Form der Wissensrepräsentation für die verschiedenen am Planungsprozess beteiligten Wissensdomänen sorgt für eine hohe Modularität des Gesamtsystems und somit für eine starke Unabhängigkeit der Wissensbanken sowohl voneinander als auch vom zentralen Inferenzmechanismus. Dies vereinfacht die Integration der heterogenen Wissensdomänen erheblich. Mit Hilfe von Inferenzmechanismen wird die lückenlose Identifikation gewerkeübergreifender Konsequenzen von Planungsänderungen ermöglicht. Die Untergliederung des Planungsprozesses in einzelne Szenarien stellt ein sehr praxisgerechtes Verfahren im Rahmen des Änderungsmanagements in der heterogenen Planungsumgebung dar.

Zur Reduktion des Kommunikationsaufwandes werden die einzelnen *MORLA-Wissensbanken* im Rahmen der Auswertung serverseitig repliziert. Diese Replikation macht eine Aufteilung der Wissensbanken in einen öffentlich einsehbaren und einen privat geschützten Bereich erforderlich. Somit ist der Schutz von firmenbezogenem Ingenieurwissen gewährleistet. Dies ist eine grundlegende Voraussetzung für die Akzeptanz des Gesamtsystems in der Praxis. Zur Evaluierung der erarbeiteten Konzepte wurden Wissensbanken beispielhaft für die Gewerke der Tragwerksplanung (Stahlbetonbau) und der Haustechnik (Raumluftechnik) erarbeitet und mit Hilfe einer Wissenserwerbskomponente implementiert.

Die Möglichkeit einer computerbasierten Abschätzung von Konsequenzen aus Planungsänderungen stellt dem Anwender ein sehr hilfreiches Werkzeug zur Seite. Der Kommunikationsaufwand zwischen den projektbeteiligten Fachplanern wird hierdurch erheblich reduziert. Potentiell aufwändige und evtl. nicht realisierbare Planungsvarianten können mit Hilfe der erarbeiteten Sensitivitätsanalyse bereits im Vorfeld identifiziert werden. Hierfür wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit

Fuzzy-Methoden verwendet. Durch ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Verfahren zur Defuzzifikation, welches die besonderen Charakteristika der verwendeten logischen Fuzzy-Modelle berücksichtigt, und die Erarbeitung eines Parameters zur Bestimmung der Spezifität resultierender Fuzzy-Ergebnismengen, erfolgt eine effiziente und an das *MORLA-Modell* angepasste Approximation von Auswirkungen. Die Verwendung von Methoden der Fuzzy-Logik für die Sensitivitätsanalyse der Veränderung planungsrelevanter Parameter ermöglicht eine Reduzierung der Komplexität sowie eine transparente, natürlichsprachliche Benutzerinteraktion.

Im *MORLA-Modell* wurden u. a. auch die Anforderungen für eine deterministische Abhängigkeitsverfolgung im Rahmen von Netzstrukturen (z.B.: Lüftungskanalnetz, Lastabtragung, o. ä.) berücksichtigt und ein gewerkeübergreifender Inferenzmechanismus entwickelt. Des Weiteren wurden Konzepte einer effizienten Steuerung und Regelung des Daten- und Informationsflusses, einer gewerkeübergreifenden Benutzerinteraktion, sowie erforderlicher Sperrmechanismen erarbeitet und mit Hilfe einer Softwareapplikation *Domain Augmented Environment for Intelligent Networked & Cooperative Design (DaVinci)* implementiert. Mit Hilfe der in *DaVinci* beinhalteten *Erklärungskomponente* wird für den Anwender die Rückverfolgung des (gewerkeübergreifenden) Rechenwegs visualisiert. Diese Nachvollziehbarkeit und somit Sicherung der Transparenz der Planungshistorie eines Bauwerks ist eine weitere Voraussetzung für die Anwendung und Akzeptanz des Systems in der Praxis.

7.2 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modelle stellen einen innovativen Ansatz zur Reduzierung des Arbeits- und Zeitaufwands im Rahmen der Änderungskontrolle im Vergleich zu der heutigen Arbeitsweise dar und versprechen darüber hinaus eine künftige domänenübergreifende Anwendbarkeit.

Durch die Aufteilung des Gesamtmodells in mehrere Teilmodelle wird die Möglichkeit der Anwendung dieses wissensbasierten Systems auch in weiteren Domänen sichergestellt. Die Anpassung der Struktur innerhalb des *PDM* ermöglicht die Anwendung der Wissensbanken auch auf adäquate Informations-Modelle.

Diesen Wissensbanken muss lediglich die Struktur des erforderlichen *PDM* zugrunde liegen. Somit ist es möglich, Wissensbanken auch auf völlig andere (Bau-)Konstruktionen anzuwenden.

Bedingt durch die offene Architektur des Modells kann ein Parameter identischer Aussage in verschiedenen Wissensinstanzen völlig unterschiedlich definiert werden. Diese Problematik wird erschwert durch die Tatsache, dass die Wissensinstanzen der Fachplaner jeweils gleichzeitig in mehreren unabhängigen Planungsprojekten Verwendung finden können. Jede Art von Verbindung zwischen entsprechenden Parametern unterschiedlicher Wissensinstanzen darf demnach zur Konsistenzsicherung ausschließlich auf Projektebene stattfinden. Der Administrationsaufwand der in diesem Projekt umgesetzten Mapping-Technik kann in großen Teilen durch Verwendung intelligenter Suchalgorithmen minimiert werden. Ist aus geometrischer und logischer Sicht kein ausreichender Zusammenhang herzustellen, so stellt der zugehörige Beschreibungstext der jeweiligen Parameter die aussagekräftigste Definition dar. Hierbei ist die detaillierte Analyse des semantischen Zusammenhanges zwischen Teilen des beschreibenden Textes erforderlich. Ein Ansatz zur entsprechend automatisierten Analyse von Texten ist deren zielgerichtete Transformierung in semantische Netze. Die Kombination mehrerer Typen von semantischen Netzen kann die Entwicklung und Erprobung einer geeigneten, intelligenten Suchkomponente, die erheblich zur Reduzierung des Administrationsaufwands beiträgt, ermöglichen. Dies ist für kritische Berechnungen aus Gründen der Sicherheit zwar nur im Bereich interaktiver Unterstützung möglich. Für unkritischere Anwendungen ist bei entsprechender Treffsicherheit eine teil- oder vollautomatisierte Suche sinnvoll durchführbar. Diese Unterscheidung ist für das Vertrauen der Fachplaner in zugehörige Parameter von entscheidender Bedeutung.

Die Möglichkeit der Vorgabe von Restriktionen mit unscharfen Grenzen für die Werte einzelner Planungsparameter durch die Planungsbeteiligten bietet eine weitere sinnvolle Anwendung von Methoden der Fuzzy-Logik im Rahmen einer vernetzten Planungsumgebung. Hierdurch wird beispielsweise das Auffinden von guten Kompromisslösungen bei hochkomplexen Entscheidungen im Rahmen von Planungs-Änderungs-Anfragen ermöglicht.

Ein kritisches Argument zum Einsatz von Expertensystemen stellt die aufwändige Wissensakquisition dar. Der so genannte „knowledge acquisition bottleneck“

verhindert eine weitere Verbreitung von Expertensystemen in der Praxis. Im Rahmen dieses Projektes wurde unter anderem durch die deklarative Wissensrepräsentation sowie durch eine benutzerfreundliche Dialogführung in der Wissenserwerbskomponente die Anwendung für den Experten vereinfacht. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitete Sensitivitätsanalyse stellt einen hocheffizienten Ansatz für die Approximation des Grades einer Parameterveränderung infolge einer Planungsmodifikation dar. Die Formalisierung des hierfür erforderlichen Ingenieurwissens, insbesondere die Abbildung komplexen Wissens mittels Fuzzy-Modellen, ist nur mit erheblichem Aufwand zu realisieren. Durch die Vorhaltung von Datensätzen aus einer Fallbasis mit den Inferenzergebnissen bereits durchlaufener Änderungsprozesse könnten zusätzliche Grundlagen sowohl zum Entwurf als auch zur Optimierung regelbasierter, logischer Fuzzy-Modelle geschaffen werden. Weitere Forschungsarbeiten sollten daher eine Automatisierung dieser Aufgabe, beispielsweise unter Einsatz von Methoden der Genetischen Programmierung [FA+04] oder auch Neuro-Fuzzy-Systemen zum Ziel haben.

ANHANG A

GRUNDLAGEN DES FUZZY-MODELLS FÜR DIE SENSITIVITÄTSANALYSE

Im Folgenden werden die Variablen mit charakteristischen Fuzzy-Mengen, sowie die zugehörige Regelbasis des erarbeiteten Fuzzy-Modells für die Sensitivitätsanalyse infolge Planungsänderungen zentrisch belasteter Stahlbetonwände aufgeführt.

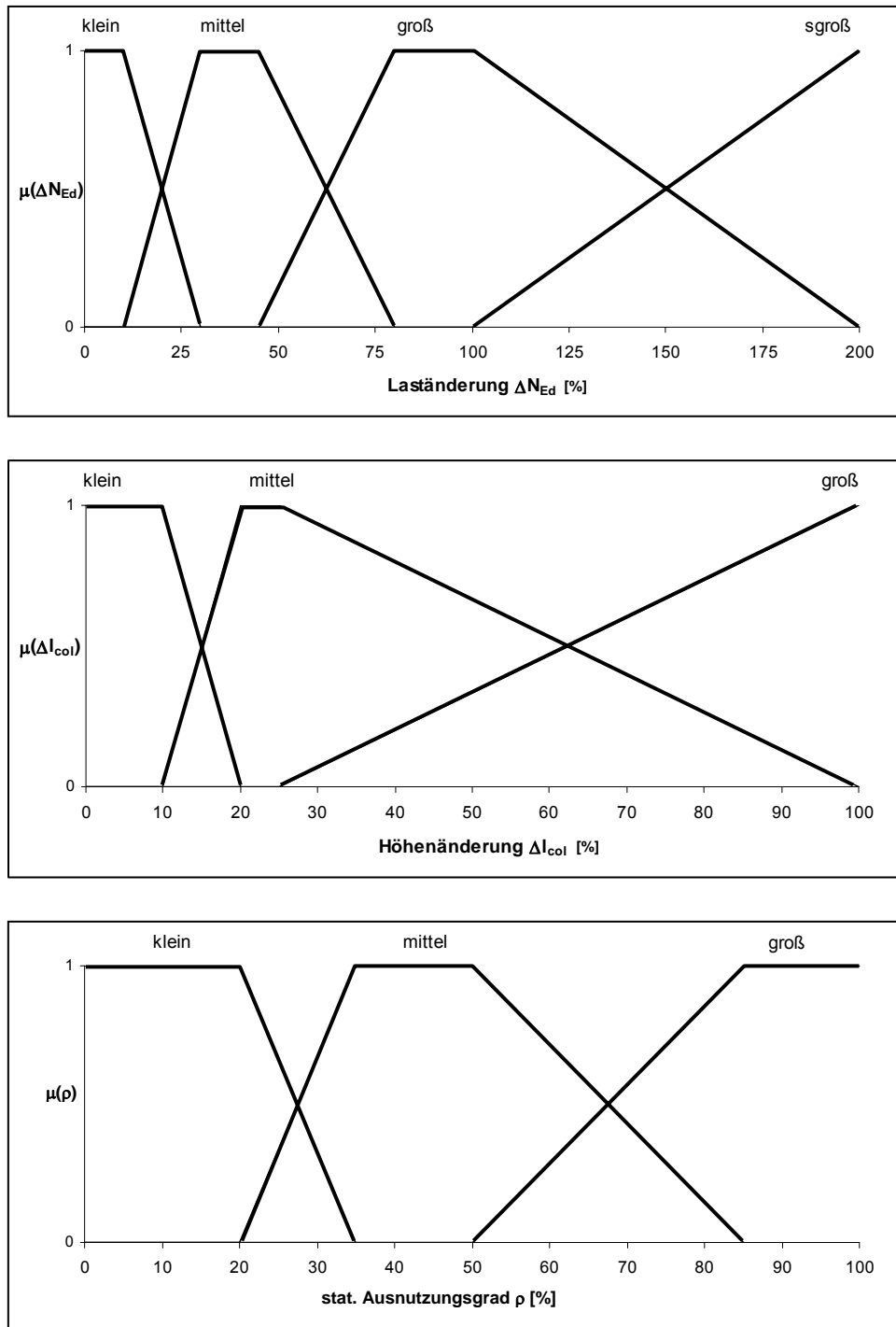


Abbildung A.1: Graphische Darstellung der Eingangsvariablen
 „Laststeigerung ΔN_{Ed} “, „Höhenänderung Δl_{col} “ und
 „stat. Ausnutzungsgrad ρ “ mit charakteristischen Fuzzy-Mengen

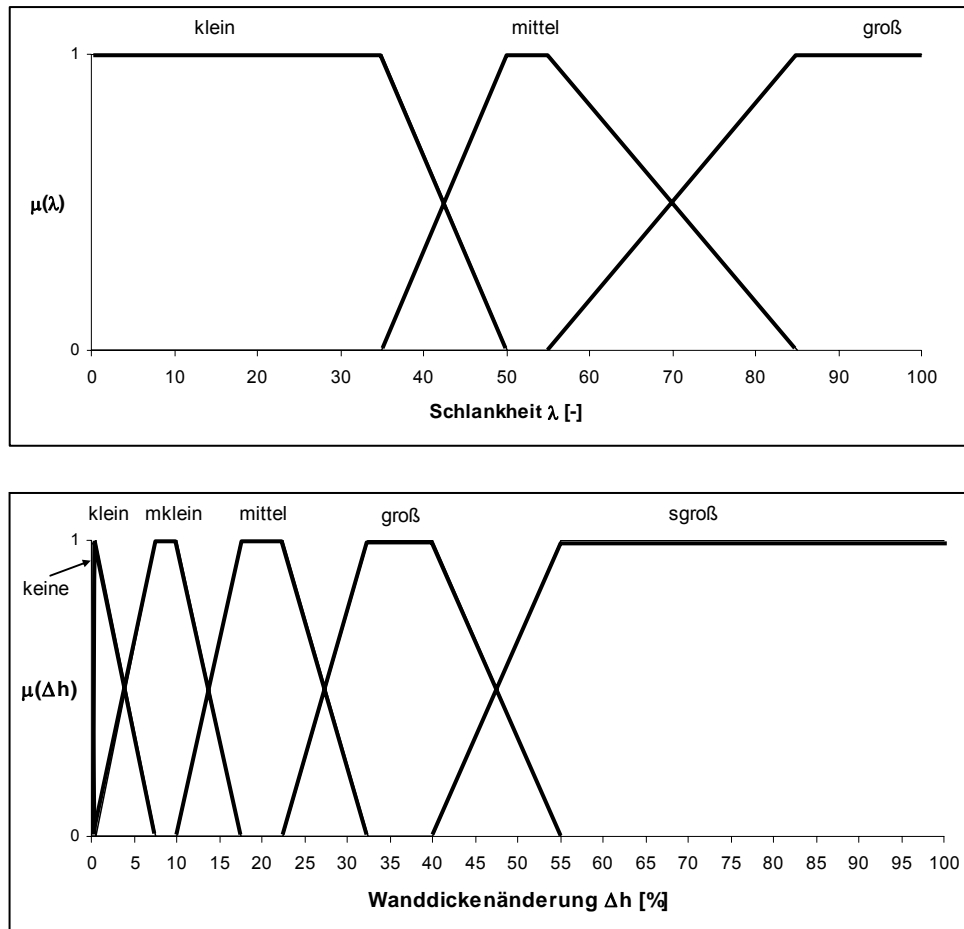


Abbildung A.2: Graphische Darstellung der Eingangsvariablen „Schlankheit λ “, sowie der Ausgabevariablen „Wanddickenänderung Δh “ mit charakteristischen Fuzzy-Mengen

Tabelle A.1: Regelbasis (Regeln Nr. 1 bis 32)

1: IF [delta_N = "klein"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "klein" OR "mittel"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"]	THEN [delta_h = "keine"]
2: IF [delta_N = "mittel"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "klein"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"]	THEN [delta_h = "keine"]
3: IF [delta_N = "groß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "klein"]	AND [Lambda = "klein"]	THEN [delta_h = "keine"]
4: IF [delta_N = "klein"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel"]	THEN [delta_h = "klein"]
5: IF [delta_N = "mittel"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "mittel"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"]	THEN [delta_h = "klein"]
6: IF [delta_N = "groß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "mittel"]	AND [Lambda = "klein"]	THEN [delta_h = "klein"]
7: IF [delta_N = "groß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "klein"]	AND [Lambda = "mittel"]	THEN [delta_h = "klein"]
8: IF [delta_N = "klein"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "groß"]	THEN [delta_h = "mklein"]
9: IF [delta_N = "mittel"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel"]	THEN [delta_h = "mklein"]
10: IF [delta_N = "groß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "mittel"]	AND [Lambda = "mittel"]	THEN [delta_h = "mklein"]
11: IF [delta_N = "groß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "klein"]	AND [Lambda = "groß"]	THEN [delta_h = "mklein"]
12: IF [delta_N = "mittel"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "groß"]	THEN [delta_h = "mittel"]
13: IF [delta_N = "groß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "mittel"]	AND [Lambda = "groß"]	THEN [delta_h = "mittel"]
14: IF [delta_N = "sgroß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "klein"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"]	THEN [delta_h = "mittel"]
15: IF [delta_N = "sgroß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "mittel"]	AND [Lambda = "mittel"]	THEN [delta_h = "mittel"]
16: IF [delta_N = "groß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"]	THEN [delta_h = "groß"]
17: IF [delta_N = "sgroß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "mittel"]	AND [Lambda = "groß"]	THEN [delta_h = "groß"]
18: IF [delta_N = "sgroß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "groß"]	THEN [delta_h = "sgroß"]
19: IF [delta_N = "sgroß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "mittel"]	AND [Lambda = "klein"]	THEN [delta_h = "sgroß"]
20: IF [delta_N = "sgroß"]	AND [delta_I = "keine"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel"]	THEN [delta_h = "sgroß"]
21: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "klein"]	AND [Ausnutzung = "klein" OR "mittel"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"]	THEN [delta_h = "keine"]
22: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "mittel"]	AND [Ausnutzung = "klein" OR "mittel" OR "groß"]	AND [Lambda = "klein"]	THEN [delta_h = "keine"]
23: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "mittel"]	AND [Ausnutzung = "klein" OR "mittel"]	AND [Lambda = "mittel" OR "groß"]	THEN [delta_h = "keine"]
24: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "klein"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"]	THEN [delta_h = "klein"]
25: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "mittel"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "groß"]	THEN [delta_h = "klein"]
26: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "groß"]	AND [Ausnutzung = "klein" OR "mittel" OR "groß"]	AND [Lambda = "klein"]	THEN [delta_h = "klein"]
27: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "mittel"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "mittel"]	THEN [delta_h = "mklein"]
28: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "groß"]	AND [Ausnutzung = "klein" OR "mittel"]	AND [Lambda = "mittel"]	THEN [delta_h = "mklein"]
29: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "groß"]	AND [Ausnutzung = "klein"]	AND [Lambda = "groß"]	THEN [delta_h = "mklein"]
30: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "groß"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "mittel" OR "groß"]	THEN [delta_h = "mittel"]
31: IF [delta_N = "keine"]	AND [delta_I = "groß"]	AND [Ausnutzung = "groß"]	AND [Lambda = "groß"]	THEN [delta_h = "mittel"]
32: IF [delta_N = "klein" OR "mittel"]	AND [delta_I = "klein"]	AND [Ausnutzung = "klein"]	AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"]	THEN [delta_h = "keine"]

Tabelle A.2: Regelbasis (Regeln Nr. 33 bis 64)

33: IF [delta_N = "klein" OR "mittel"] AND [delta_I = "klein"] AND [Ausnutzung = "mittel"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "klein"]
34: IF [delta_N = "klein"] AND [delta_I = "klein"] AND [Ausnutzung = "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "mklein"]
35: IF [delta_N = "mittel"] AND [delta_I = "klein"] AND [Ausnutzung = "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "mittel"]
36: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "klein"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "klein"]
37: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "klein"] AND [Ausnutzung = "mittel"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "mklein"]
38: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "klein"] AND [Ausnutzung = "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "groß"]
39: IF [delta_N = "sgroß"] AND [delta_I = "klein"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "mittel"]
40: IF [delta_N = "sgroß"] AND [delta_I = "klein"] AND [Ausnutzung = "mittel" OR "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "sgroß"]
41: IF [delta_N = "klein"] AND [delta_I = "mittel"] AND [Ausnutzung = "klein" OR "mittel"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "keine"]
42: IF [delta_N = "klein"] AND [delta_I = "mittel"] AND [Ausnutzung = "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "klein"]
43: IF [delta_N = "mittel"] AND [delta_I = "mittel"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "keine"]
44: IF [delta_N = "mittel"] AND [delta_I = "mittel"] AND [Ausnutzung = "mittel"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "klein"]
45: IF [delta_N = "mittel"] AND [delta_I = "mittel"] AND [Ausnutzung = "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "mittel"]
46: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "mittel"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "klein"]
47: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "mittel"] AND [Ausnutzung = "mittel"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "mklein"]
48: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "mittel"] AND [Ausnutzung = "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "sgroß"]
49: IF [delta_N = "sgroß"] AND [delta_I = "mittel"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "mittel"]
50: IF [delta_N = "sgroß"] AND [delta_I = "mittel"] AND [Ausnutzung = "mittel" OR "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "sgroß"]
51: IF [delta_N = "klein"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "klein" OR "mittel"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "klein"]
52: IF [delta_N = "klein"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "mklein"]
53: IF [delta_N = "mittel"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "klein"]
54: IF [delta_N = "mittel"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "mittel"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel"] THEN [delta_h = "mklein"]
55: IF [delta_N = "mittel"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "mittel"]
56: IF [delta_N = "mittel"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "mittel"] AND [Lambda = "groß"] THEN [delta_h = "mittel"]
57: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "klein"] THEN [delta_h = "mklein"]
58: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "mittel"] THEN [delta_h = "mittel"]
59: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "mittel"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "groß"]
60: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "groß"] THEN [delta_h = "groß"]
61: IF [delta_N = "groß"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "sgroß"]
62: IF [delta_N = "sgroß"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "klein"] THEN [delta_h = "mittel"]
63: IF [delta_N = "sgroß"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "klein"] AND [Lambda = "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "groß"]
64: IF [delta_N = "sgroß"] AND [delta_I = "groß"] AND [Ausnutzung = "mittel" OR "groß"] AND [Lambda = "klein" OR "mittel" OR "groß"] THEN [delta_h = "sgroß"]

ANHANG B

VERANKERTE METHODEN VON PDM-ZUGRIFFEN

Im Folgenden wird eine Katalogisierung der verankerten Methoden von PDM-Zugriffen vorgenommen. Die Auflistung zeigt die im Produkt-Daten-Modell vorhandenen Elementklassen mit zugehörigen verankerten Methoden. Zudem werden eine Kurzbeschreibung und der Typ des jeweiligen Rückgabeparameters angegeben. Aus der Spalte *Art* kann abgelesen werden, um welchen Typ von Produkt-Daten-Modell-Zugriff es sich handelt (Basis- oder abgeleitetes BE-Element).

Tabelle B.1: Katalogisierung verankerter Methoden von PDM-Zugriffen

PDM-Elementklasse	Methode(n)	ermittelter Wert	Art	Typ
Building	BUNAME	Elementname	B*	TEXT*
Floor	FLNAME	Elementname	B	TEXT
Group	GRNAME	Elementname	B	TEXT
Element	BTNAME	Elementname	B	TEXT
	EXT_X (Y, Z)	Abmessung(en)	B	NUM*
	POS_X (Y, Z)	Position(en)/Lage	B	NUM
Horizontal element	EXT_X (Y, Z)	Abmessung(en)	B	NUM
Vertical element	EXT_X (Y, Z)	Abmessung(en)	B	NUM
HVAC_Element	TEST			
Room	AREA	Raumfläche	A*	NUM
	VOLUME	Raumvolumen	A	NUM
	COUNT_EXHAUST	Anzahl Auslässe	A	NUM
	SUS_CEIL_A (B)	Δ Einbaumaß(e)	A	NUM
	SUS_CEIL_H	Höhe Abhängung	A	NUM
	SUS_CEIL_PRESENT	Abhängung j/n	A	NUM
Slab	EXT_D (X, Y)	Abmessung(en)	B	NUM
Beam	POS_X (Y, Z)	Position(en)/Lage	B	NUM
	EXT_D (H, L)	Abmessung(en)	B	NUM
Foundation	POS_X (Y, Z)	Position(en)/Lage	B	NUM
	EXT_D (X, Y)	Abmessung(en)	B	NUM
	POS_X (Y, Z)	Position(en)/Lage	B	NUM
Wall	EXT_D (H, L)	Abmessung(en)	B	NUM
Column	POS_X (Y, Z)	Position(en)/Lage	B	NUM
	EXT_D (H, W)	Abmessung(en)	B	NUM
	POS_X (Y, Z)	Position(en)/Lage	B	NUM
	POS_CORNER	Eckstütze j/n	B	BOOL*
	POS_EDGE	Randstütze j/n	B	BOOL
	POS_INSIDE	Innenstütze j/n	B	BOOL
HVAC_Pipes	DIAMETER		B	NUM
HVAC_Profile	PROFILE_EX	Endprofil	B	ELEM*
	PROFILE_VENT	Anfangsprofil	B	ELEM
	DIM_X (Y)	Abmessung(en)	B	NUM
	ELEMENT_EX	zugeord. Element	B	ELEM
HVAC_Fan	ELEMENT_VENT	zugeord. Element	B	ELEM
	PROFILE_EX	Endprofil	B	ELEM
	PROFILE_VENT	Anfangsprofil	B	ELEM
	ROOM	zugeord. Raum	B	ELEM
HVAC_Exhaust	SHAPE	Querschnittsform	B	TEXT

Tabelle B.2: Katalogisierung verankerter Methoden von PDM-Zugriffen

Elementklasse	Methode(n)	Beschreibung	Art	Typ
HVAC_Pipe	LENGTH	Rohrlänge	B	NUM
	DIAMETER		B	NUM
HVAC_Edge	PROFILE_VENT	Anfangsprofil	B	ELEM
	PROFILE_EX	Endprofil	B	ELEM
HVAC_Junction	TEST			
	DIAMETER		B	NUM
HVAC_Junction	PROFILE_VENT	Anfangsprofil	B	ELEM
	PROFILE_EX	Endprofil	B	ELEM
Design location slab area	TEST			
	PROFILE_VENT	Anfangsprofil	B	ELEM
Design location slab column	PROFILE_EX1	Endprofil 1	B	ELEM
	PROFILE_EX2	Endprofil 2	B	ELEM
Design location slab area	AREA	Fläche	B	NUM
Design location slab column	COOR_X1 (X2, Y1, Y2)	Lagekoordinate(n)	B	NUM
	COOR_X (Y)	Lagekoordinate(n)	B	NUM
Design location slab X top	ELEMENT	zugeord. Element	B	ELEM
	AREA	Fläche	B	NUM
Design location slab X lower	COOR_X1 (X2, Y1, Y2)	Lagekoordinate(n)	B	NUM
	AREA	Fläche	B	NUM
Design location slab Y top	COOR_X1 (X2, Y1, Y2)	Lagekoordinate(n)	B	NUM
	AREA	Fläche	B	NUM
Design location slab Y lower	COOR_X1 (X2, Y1, Y2)	Lagekoordinate(n)	B	NUM
	AREA	Fläche	B	NUM
B = PDM-Zugriff (Basiselement) A = PDM-Zugriff (abgeleitetes Element) NUM = numerischer Wert TEXT = Zeichenkette BOOL = Boolean ELEM = Element				

ANHANG C

ELEMENTE DER

MORLA-WISSENSBANKEN

Im Folgenden werden beispielhaft die Elemente der MORLA-Wissensbank des Gewerkes der Haustechnik für die Nachweisführung raumluftechnischer Anlagen dargestellt.

Tabelle C.1: BE-Elemente (*Assignment*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifier	Description	Assignment	
		Productmodel	Content
txt_Nachweis	Textmeldung: Der vorhandene Ausnutzungsgrad liegt im Ausnutzungsintervall, dieses ist jedoch fehlerhaft definiert.	HVAC_Profile	'Fehler - Ausnutzungsgrad_Profil_min und Ausnutzungsgrad_Profil_max wurden nicht eingehalten'
txt_Nachweis	Textmeldung: Der vorhandene Ausnutzungsgrad überschreitet den oberen Grenzwert.	HVAC_Profile	'Fehler - Ausnutzungsgrad_Profil_max wurde nicht eingehalten'
txt_Nachweis	Textmeldung: Der vorhandene Ausnutzungsgrad unterschreitet den unteren Grenzwert.	HVAC_Profile	'Fehler - Ausnutzungsgrad_Profil_min wurde nicht eingehalten'
txt_Nachweis	Textmeldung: Der Nachweis wurde erbracht.	HVAC_Profile	'Nachweis erbracht'
txt_Eingabe	Testausgabe: Der eingegebene untere Ausnutzungsgrad ist kleiner als der obere Ausnutzungsgrad.	HVAC_Profile	'Eingabe: Ausnutzungsgrad_Profil_min < Ausnutzungsgrad_Profil_max - Überprüfung: ok!'
txt_Eingabe	Testausgabe: Der eingegebene untere Ausnutzungsgrad ist größer als der obere Ausnutzungsgrad.	HVAC_Profile	'Eingabe: Ausnutzungsgrad_Profil_min > Ausnutzungsgrad_Profil_max - Überprüfung: Fehler!'
txt_Eingabe	Testausgabe: Es gibt einen festen Ausnutzungsgrad	HVAC_Profile	'Eingabe: Ausnutzungsgrad_Profil_min = Ausnutzungsgrad_Profil_max - Überprüfung: ok! Es wurde mit festem Ausnutzungsgrad gerechnet.'
txt_Nachweis		HVAC Pipes	[Zuordnung_Ausgang.txt_Nachweis]
txt_Eingabe		HVAC Pipes	[Zuordnung_Ausgang.txt_Eingabe]
txt_Nachweis1		HVAC Junction	[Zuordnung_Ausgang_1.txt_Nachweis]
txt_Nachweis2		HVAC Junction	[Zuordnung_Ausgang_2.txt_Nachweis]
txt_Eingabe1		HVAC Junction	[Zuordnung_Ausgang_1.txt_Eingabe]
txt_Eingabe2		HVAC Junction	[Zuordnung_Ausgang_2.txt_Eingabe]

Tabelle C.2: BE-Elemente (*Constant*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifier	Description	Constant	
		Productmodel	Content
Null	Allgemeine Konstante über die verschiedene Werte zu 'NULL' gesetzt werden können.	Building	Value=0.0000 -
delta_V	Eine Erhöhung des Mindest-Außenluftvolumenstroms aufgrund belästigender Geruchsquellen nach DIN 1946 liegt vor. 'delta_V' wird der konstante Wert 20 m³/h zugewiesen.	Building	Value=20.0000 m³/h
Faktor_1	Umrechnungsfaktor für die Ermittlung des erforderlichen Luftvolumenstroms anhand des Schadstoffanfalls unter Verwendung der Einheit cm³/m³. 'Faktor_1' wird der konstante Wert 1 zugewiesen.	Room	Value=1.0000 -
Faktor_1	Umrechnungsfaktor für die Ermittlung des erforderlichen Luftvolumenstroms anhand des Schadstoffanfalls unter Verwendung der Einheit mg/m³. 'Faktor_1' wird der konstante Wert 1.000.000 zugewiesen.	Room	Value=1000000.0000 -
Faktor_2	Umrechnungsfaktor für die Ermittlung von Luftvolumenströmen anhand der erforderlichen Kühllast. 'Faktor_2' wird der konstante Wert 3.600 s/h zugewiesen.	Building	Value=3600.0000 s/h
roh	Dichte der Luft. 'roh' wird der konstante Wert 1,2 kg/m³ zugewiesen.	Building	Value=1.2000 kg/m³
c	Spezifische Wärmekapazität der Luft. 'c' wird der konstante Wert 1.000 W*s/(kg*K) zugewiesen.	Building	Value=1000.0000 W*s/(kg*K)
Eins	Allgemeine Konstante über die verschiedene Werte zu 'EINS' gesetzt werden können.	Building	Value=1.0000 -
V_Max		HVAC_Fan	Value=20000.0000 m³/h

Tabelle C.3: BE-Elemente (*Komplex Table*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifier	Description	Komplex Table	
		Productmodel	Content
personenbezogen; flaechenbezogen	Komplexe Tabelle 'Mindestaussenluftstrom' nach DIN 1946 Teil 2, Tabelle 3.	Room	complex content
cm3_m3;mg_m3	Komplexe Tabelle 'MAK-Liste'. Stand 1996/99, stark gekürzt.	Room	complex content
Komfortbereich_niedrig; Industrie_niedrig; Komfortbereich_hoch; Industrie_hoch	Komplexe Tabelle 'Untertemperatur' nach Tabellenbuch: Sanitär - Heizung - Lüftung.	Room	complex content
Mindestvolumen	Komplexe Tabelle 'Sonstiger Mindestaussenluftstrom', berücksichtigt Verweise nach DIN 1946 Teil 2, Tabelle 3.	Room	complex content

Tabelle C.4: BE-Elemente (*Formula – Teil 1*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifizier	Description	Formula	
		Productmodel	Content
delta_V	Eine Erhöhung des Mindest-Aussenluftvolumenstroms aufgrund belastigender Geruchsquellen liegt nicht vor. 'delta_V' wird der Wert 'NULL' zugewiesen.	Room	[Null]
V_min_Personen	Formel zur Ermittlung des personenbezogenen Mindestaussenluftstrom nach DIN 1946 Teil 2, Tabelle 3.	Room	[n_Personen]*((delta_V)+[personenbezogen])
V_min_Flaeche	Formel zur Ermittlung des flächenbezogenen Mindestaussenluftstrom nach DIN 1946 Teil 2, Tabelle 3.	Room	[A_Raum]*[flaechenbezogen]+[n_Personen]*[delta_V]
V_DIN	Formel als Zuweisung des personenbezogenen Mindestaussenluftstrom nach DIN 1946 Teil 2.	Room	[V_min_Personen]
V_DIN	Formel als Zuweisung des flächenbezogenen Mindestaussenluftstrom nach DIN 1946 Teil 2.	Room	[V_min_Flaeche]
k_mak	Formel als Zuweisung des maßgebenden MAK-Wert nach der MAK-Liste in cm ³ /m ³ .	Room	[k_mak_cm_tab]
k_mak	Formel als Zuweisung des maßgebenden MAK-Wert nach der MAK-Liste in mg/m ³ .	Room	[k_mak_mg_tab]
V_mak	Formel zur Ermittlung des schadstoffbezogenen Mindest-Aussenluftvolumenstroms nach DIN 1946 Teil 2.	Room	((Faktor_1)*[k_vorh])/([k_mak]-[k_aussen])
V_mak	Formel zur Ermittlung des schadstoffbezogenen Mindest-Aussenluftvolumenstroms nach DIN 1946 Teil 2. 'V_mak' wird der Wert 'NULL' zugewiesen.	Room	[Null]
V_Eingabe	Formel zur Berechnung des gewünschten Luftvolumenstrom anhand von Luftwechselzahlen.	Room	[LW]*[V_Raum]
V_Vorgabe	Formel zur Ermittlung des gewünschten Luftvolumenstrom anhand von Vorgaben. 'V_Vorgabe' wird zu 'NULL' gesetzt.	Room	[Null]
V_erf	Formel zur Ermittlung des erforderlichen Raumlufthvolumenstromes inkl. der indirekt zu versorgenden Bereiche.	Room	[V_erf_Raum]+[V_Anschlussraum]
Luftvolumen	Formel zur Ermittlung des erforderlichen Luftvolumenstroms am Auslass.	Room	[V_erf_Auslass]
Luftvolumen	Formel zur Ermittlung des erforderlichen Luftvolumenstroms am Abzweig.	HVAC_Junction	[Zuordnung_Ausgang_1.Luftvolumen]+[Zuordnung_Ausgang_2.Luftvolumen]
Luftvolumen	Formel zur Ermittlung des erforderlichen Luftvolumenstroms am Kanalelement, Anlagenbauteil oder Querschnitt.	HVAC_Element	[Zuordnung_Ausgang.Luftvolumen]
A_erf	Formel zur Ermittlung des benötigten Mindestquerschnitts für den am Querschnitt vorhandenen Luftvolumenstrom.	HVAC_Profile	[Luftvolumen]/([Faktor_2]*[v_zul])
A_vorh	Formel zur Ermittlung der vorhandenen Querschnittsfläche des rechteckigen Profiles.	HVAC_Profile	[dim_Profil_x]*[dim_Profil_y]
A_vorh	Formel zur Ermittlung der vorhandenen Querschnittsfläche des runden Profiles.	HVAC_Profile	0,25*pi()*((2*[dim_Profil_x])^2)
Ausnutzungsgrad_Profil_vorh	Formel zur Ermittlung des vorhandenen Ausnutzungsgrades des Profils.	HVAC_Profile	[A_erf]/[A_vorh]
Ausnutzungsgrad_Profil_min	Formel zur Ermittlung des minimalen Ausnutzungsgrades des Profils.	HVAC_Profile	[Ausnutzungsgrad_Profil_inf]/100
Ausnutzungsgrad_Profil_max	Formel zur Ermittlung des maximalen Ausnutzungsgrades des Profils.	HVAC_Profile	[Ausnutzungsgrad_Profil_sup]/100
delta_t	Formel zur Ermittlung der vorhandenen Untertemperatur anhand von Temperaturangaben.	Room	[t_Raum]-[t_Zuluft]
delta_t	Formel als Zuweisung der vorhandenen Untertemperatur nach Tabellenbuch: Sanitär - Heizung - Lüftung.	Room	[Komfortbereich_niedrig]
Faktor_3	Umrechnungsfaktor für die Ermittlung der benötigten Kühlleistung eines Raumes.	Building	[Faktor_2]/([c]*[roh])*[delta_t]
V_RLT	Formel zur Ermittlung des benötigten Luftvolumenstroms anhand der Kühlleistung des Raumes.	Room	[Q_KR]*[Faktor_3]
V_Direktkuehlung	Formel zur Ermittlung der Leistung der Raumdirektkühlung anhand von absoluten Leistungsangaben.	Room	[Q_Direktkuehlung]*[Faktor_3]
V_Direktkuehlung	Formel zur Ermittlung der Leistung der Raumdirektkühlung. 'V_Direktkühlung' wird zu 'NULL' gesetzt, da keine Direktkühlung vorhanden ist.	Room	[Null]

Tabelle C.5: BE-Elemente (*Formula – Teil 2*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifizier	Description	Formula	
		Productmodel	Content
Ausnutzungsgrad_Kuehlast_bezogen	Formel zur Ermittlung des vorhandenen Ausnutzungsgrades der Raum(decken)fläche für die Berechnung der für Raumdirektkühlung nutzbaren Fläche.	Room	$[Ausnutzungsgrad_Kuehlast]/100$
Q_max	Formel zur Ermittlung der maximal möglichen Leistung der Raumdirektkühlung bei Nutzung der gesamten Raum(decken)fläche.	Room	$[q_direkt]*[A_Raum]$
Q_KR	Formel zur Ermittlung der benötigten Kühllast des Raumes.	Room	$[Q_i]+[Q_a]$
Q_i	Formel zur Ermittlung der inneren Kühllasten des Raumes.	Room	$[Q_p]+[Q_b]+[Q_m]+[Q_c]+[Q_g]$
V_Kuehlast	Formel zur Ermittlung des erforderlichen Luftvolumenstroms anhand der Kühllast des Raumes abzüglich der durch die Direktkühlung erbrachten Leistung.	Room	$[V_RLT]-[V_Direktkuehlung]$
Q_b	Formel zur vereinfachten flächenbezogenen Ermittlung der Kühllast eines Raumes infolge Beleuchtung nach VDI 2078.	Room	$[A_Raum]*[q_b]$
Q_p	Formel zur vereinfachten Ermittlung der Kühllast des Raumes infolge Personen nach VDI 2078.	Room	$[Anzahl_p]*[q_p]$
Druckverlust	Formel Zuweisung des Druckverlustes eines Auslasses.	HVAC_Exhaust	$[Druckverlust_eigen]$
Druckverlust	Formel zur Ermittlung des Druckverlustes des vorangegangenen Kanalabschnittes.	HVAC_Profile	$[Zuordnung_Ausgang.Druckverlust]$
Druckverlust	Formel zur Ermittlung des maximalen Druckverlustes aus den beiden vorangegangenen Kanalabschnitten.	HVAC_Junction	$[Druckverlust_eigen]+max([Zuordnung_Ausgang_1.Druckverlust]; [Zuordnung_Ausgang_2.Druckverlust])$
Druckverlust_eigen	Formel zur Ermittlung des Druckverlustanteils durch das Bauteil selbst.	HVAC_Junction	$[zeta_junction]*[roh]*([v_vorh_junction]^2)*0.5$
Druckverlust_eigen	Formel zur Ermittlung des Druckverlustanteils durch das Bauteil selbst.	HVAC_Edge	$[zeta_edge]*[roh]*([v_vorh_edge]^2)*0.5$
v_vorh_junction	Formel zur Ermittlung der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeit am Bauteil.	HVAC_Junction	$[Zuordnung_Ausgang_1.Luftvolumen]/([Zuordnung_Ausgang_1.A_vorh]*[Faktor_2])$
v_vorh_junction	Formel zur Ermittlung der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeit am Bauteil.	HVAC_Junction	$[Zuordnung_Ausgang_2.Luftvolumen]/([Zuordnung_Ausgang_2.A_vorh]*[Faktor_2])$
v_vorh_edge	Formel zur Ermittlung der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeit am Bauteil.	HVAC_Edge	$[Luftvolumen]/([Zuordnung_Ausgang.A_vorh]*[Faktor_2])$
Druckverlust	Formel zur Ermittlung des Druckverlustes an einem Ventilator, Rohr oder Bogen.	HVAC_Element	$[Druckverlust_eigen]+[Zuordnung_Ausgang.Druckverlust]$
Eigen_pipe	Formel zur Ermittlung des Druckverlustanteils durch das Bauteil selbst.	HVAC_Pipe	$[R]*[Rohrlaenge]$
Eigen_pipe	Formel zur Ermittlung des Druckverlustanteils durch das Bauteil selbst.	HVAC_Pipe	$[zeta_pipe]*[roh]*([v_vorh_pipe]^2)*0.5$
v_vorh_pipe	Formel zur Ermittlung der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeit am Bauteil.	HVAC_Pipe	$[Luftvolumen]/([Zuordnung_Ausgang.A_vorh]*[Faktor_2])$
V_min	Formel als Zuweisung des maßgebenden Mindest-Aussenluftvolumenstroms anhand von Verweisen in DIN 1946 Teil 2, Tabelle 3	Room	$[Mindestvolumen]$
V_min	Formel als Zuweisung des maßgebenden Mindest-Aussenluftvolumenstroms nach DIN 1946 Teil 2, Tabelle 3.	Room	$[V_DIN]$
n_Personen	Formel als Zuweisung der vorhandenen Raumbellegungszahl.	Room	$[Anzahl_p]$
V_Direktkuehlung	Formel zur Berechnung des zusätzlichen Luftvolumenstroms infolge der Leistung der Raumdirektkühlung.	Room	$[Q_Direkt]*[Faktor_3]$
V_erf_Auslass	Formel zur Ermittlung des je Raumausslass erforderlichen Luftvolumenstroms.	Room	$[V_erf]/[n_Auslaesse]$
V_erf_Raum	Formel zur Ermittlung des erforderlichen Raumluftvolumenstroms.	Room	$max(max([V_Vorgabe];[V_Kuehlast]);max([V_min];[V_mak]))$

Tabelle C.6: BE-Elemente (*Formula – Teil 3*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifizier	Description	Formula Productmodel	Content
V_Anschlussraum	Formel zur exakten Ermittlung des erforderlichen Raumluftvolumenstroms eines indirekt zu versorgenden Raumes.	Room	[Raum_ID.V_erf_Raum]
V_erf	Formel zur Ermittlung des erforderlichen Raumluftvolumenstroms ohne indirekt zu versorgende Bereiche.	Room	[V_erf_Raum]
k_mak	Formel als Zuweisung des maßgebenden MAK-Wert nach Angabe in cm ³ /m ³ .	Room	[k_mak_cm_user]
k_mak_cm_tab	Formel als Zuweisung des MAK-Wertes nach der MAK-Liste in cm ³ /m ³ .	Room	[cm3_m3]
Einheit	Formel als Zuweisung der vorhandenen Einheit des MAK-Wertes. 'Einheit' wird der Wert 'EINS' zugewiesen.	Room	[Eins]
Einheit	Formel als Zuweisung der vorhandenen Einheit des MAK-Wertes. 'Einheit' wird der Wert 'NULL' zugewiesen.	Room	[Null]
Nachweis_Kanal	Formel zur Zuweisung des Nachweisergebnisses. Wird für die Nachweise der Abhängung benötigt. 'Nachweis_Kanal' wird der Wert 'NULL' zugewiesen.	HVAC_Profile	[Null]
Nachweis_Kanal	Formel zur Zuweisung des Nachweisergebnisses. Wird für die Nachweise der Abhängung benötigt. 'Nachweis_Kanal' wird der Wert 'EINS' zugewiesen.	HVAC_Profile	[Eins]
V_Vorgabe	Formel als Zuweisung des gewünschten Luftvolumenstroms anhand von Vorgaben.	Room	[V_Eingabe]
h_erf	Formel als Zuweisung der Höhe des Querschnittsprofils.	HVAC_Profile	[dim_Profil_x]
h_erf	Formel als Zuweisung der Höhe des Querschnittsprofils.	HVAC_Profile	[dim_Profil_y]
h_Abhaengung	Formel zur Ermittlung der lichten Abhängungshöhe.	HVAC_Profile	[Raum_Abhaengung.Hoehe]-[Raum_Abhaengung.Hoehe_a]-[Raum_Abhaengung.Hoehe_b]
h_vorh	Formel zur Berechnung des zur Verfügung stehenden Einbaumasses der Abhängung.	HVAC_Profile	[h_Abhaengung]-[delta_h]
Abhaengung_vorhanden	Formel zur Bestimmung des Abhängungsstatus eines zugeordneten Profils.	HVAC_Profile	[Raum_Abhaengung.Abhaengungsstatus]
k_mak_mg_tab	Formel als Zuweisung des MAK-Wertes nach der MAK-Liste in mg/m ³ .	Room	[mg_m3]
Einheit	Formel als Zuweisung der vorhandenen Einheit des MAK-Wertes.	Room	[Einheitenentscheidung]
Einheitenentscheidung	Formel als Zuweisung der vorhandenen Einheit des MAK-Wertes. 'Einheitenentscheidung' wird der Wert 'NULL' zugewiesen.	Room	[Null]
Einheitenentscheidung	Formel als Zuweisung der vorhandenen Einheit des MAK-Wertes. 'Einheitenentscheidung' wird der Wert 'EINS' zugewiesen.	Room	[Eins]
k_mak	Formel als Zuweisung des maßgebenden MAK-Wert nach Angabe in mg/m ³ .	Room	[k_mak_mg_user]
k_aussen	Formel als Zuweisung der Aussenluftkonzentration des Schadstoffes in mg/m ³ .	Room	[k_aussen_mg_user]
k_aussen	Formel als Zuweisung der Aussenluftkonzentration des Schadstoffes in cm ³ /m ³ .	Room	[k_aussen_cm_user]
k_vorh	Formel als Zuweisung der vorhandenen/anfallenden Konzentration des Schadstoffes in cm ³ /h.	Room	[k_vorh_cm_user]
k_vorh	Formel als Zuweisung der vorhandenen/anfallenden Konzentration des Schadstoffes in kg/h.	Room	[k_vorh_mg_user]
Druckverlust_eigen	Formel als Zuweisung des Druckverlustes durch einen Auslass.	HVAC_Exhaust	[Eigen_exhaust]
Druckverlust_eigen	Formel als Zuweisung des Druckverlustes durch einen Ventilator.	HVAC_Fan	[Eigen_fan]
Druckverlust_eigen	Formel als Zuweisung des Druckverlustes durch ein Leitungselement.	HVAC_Pipe	[Eigen_pipe]
Eigen_pipe	Formel zur Ermittlung des Druckverlustanteils durch das Bauteil selbst.	HVAC_Pipe	[Eigen_pipe_user]

Tabelle C.7: BE-Elemente (*Userinput – Teil 1*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifizier	Description	Userinput	
		Productmodel	Content
Geruchsquelle	Abfrage, ob eine zusätzliche belästigende Geruchsquelle nach DIN 1946 vorhanden ist.	Room	Type=Text
Raumart	Abfrage zur Ermittlung des Eingangswertes für die Komplexe Tabelle 'Mindestaussenluftstrom' nach DIN 1946 Teil 2, Tabelle 3.	Room	Type=Text
Anzahl_p	Abfrage der Raumbelegungszahl.	Room	Type=Numerical
Schadstoffart	Abfrage zur Ermittlung des Eingangswertes für die Komplexe Tabelle 'MAK-Liste'.	Room	Type=Text
k_mak_cm_user	Abfrage des maßgebenden MAK-Wert in der Einheit cm ³ /m ³ .	Room	Type=Numerical
k_mak_mg_user	Abfrage des maßgebenden MAK-Wert in der Einheit mg/m ³ .	Room	Type=Numerical
Grenzwerteingabe	Abfrage, ob der MAK-Wert per Hand eingegeben werden soll.	Room	Type=Text
Einheitenwahl	Abfrage der zu verwendenden Einheit.	Room	Type=Text
k_vorh_cm_user	Abfrage des vorhandenen Schadstoffanfalls in der Einheit cm ³ /h.	Room	Type=Numerical
k_vorh_mg_user	Abfrage des vorhandenen Schadstoffanfalls in der Einheit kg/h.	Room	Type=Numerical
k_aussen_cm_user	Abfrage der Schadstoffkonzentration der Aussenluft in der Einheit cm ³ /m ³ .	Room	Type=Numerical
k_aussen_mg_user	Abfrage der Schadstoffkonzentration der Aussenluft in der Einheit mg/m ³ .	Room	Type=Numerical
Schadstoffanfall	Abfrage, ob ein Schadstoffanfall vorhanden ist.	Room	Type=Text
LW	Abfrage der gewünschten Luftwechselzahl.	Room	Type=Numerical
V_Eingabe	Abfrage für die freien Eingabe des gewünschten Luftstrom.	Room	Type=Numerical
Eingabeart_Luftvolumenstrom	Abfrage, wie der Luftvolumenstrom ermittelt werden soll.	Room	Type=Text
Volumenvorgabe	Abfrage, ob der Luftvolumenstrom per Hand eingegeben werden soll.	Room	Type=Text
v_zul	Abfrage zur Ermittlung der im Kanalschnitt gewünschten Strömungsgeschwindigkeit.	HVAC_Profile	Type=Numerical
Ausnutzungsgrad_Profil_inf	Abfrage zur Ermittlung des unteren Ausnutzungsgrades des Profils.	HVAC_Profile	Type=Numerical
Ausnutzungsgrad_Profil_sup	Abfrage zur Ermittlung des oberen Ausnutzungsgrades des Profils.	HVAC_Profile	Type=Numerical
t_Raum	Abfrage der zulässigen der Raumtemperatur.	Room	Type=Numerical
t_Zuluft	Abfrage der Zulufttemperatur.	Room	Type=Numerical
Auslassart	Abfrage zur Ermittlung der eingebauten Auslassart.	Room	Type=Text
Eingabeart_delta_t	Abfrage, wie die Untertemperatur ermittelt werden soll.	Room	Type=Text
Q_Direktkuehlung	Abfrage der absoluten Leistung einer Direktkühlung.	Room	Type=Numerical
Ausnutzungsgrad_Kuehllast	Abfrage der für eine Direktkühlung zu nutzenden Fläche.	Room	Type=Numerical
q_direkt	Abfrage der flächenbezogenen Leistung einer Direktkühlung.	Room	Type=Numerical
Q_a	Abfrage zur vereinfachten Ermittlung der äußeren Kühllasten nach VDI 2078.	Room	Type=Numerical
Kuehlungswahl	Abfrage der Art der Direktkühlung.	Room	Type=Text
Q_m	Abfrage zur vereinfachten Ermittlung der Wärmeentwicklung infolge von Maschinen/Geräte nach VDI 2078.	Room	Type=Numerical
Q_g	Abfrage zur vereinfachten Ermittlung der Wärmeentwicklung infolge von Stoffdurchsatz nach VDI 2078.	Room	Type=Numerical
Q_c	Abfrage zur vereinfachten Ermittlung der Wärmeentwicklung infolge sonstiger Einwirkungen nach VDI 2078.	Room	Type=Numerical
q_b	Abfrage zur vereinfachten Ermittlung der Wärmeentwicklung infolge von Beleuchtung nach VDI 2078.	Room	Type=Numerical
Eigen_fan	Abfrage zur Ermittlung des Druckverlust Z (Einzelwiderstand) des Ventilators.	HVAC_Fan	Type=Numerical
Eigen_exhaust	Abfrage zur Ermittlung des Druckverlust Z (Einzelwiderstand) des Auslasses.	HVAC_Exhaust	Type=Numerical
zeta_edge	Abfrage zur Ermittlung des Zeta-Wertes (Verlustbeiwert) des Bogens.	HVAC_Edge	Type=Numerical
zeta_junction	Abfrage zur Ermittlung des Zeta-Wertes (Verlustbeiwert) des T-Stücks.	HVAC_Junction	Type=Numerical
Kanaltyp	Abfrage zur Ermittlung des Kanaltyps eines geraden Leitungselementes bzw. Anlagenbauteils.	HVAC_Pipe	Type=Text
zeta_pipe	Abfrage zur Ermittlung des Zeta-Wertes (Verlustbeiwert) des Reduktionsstückes.	HVAC_Pipe	Type=Numerical

Tabelle C.8: BE-Elemente (*Userinput – Teil 2*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifizier	Description	Userinput	
		Productmodel	Content
R	Abfrage zur Ermittlung des Reibungswiderstandes R des Kanalelementes.	HVAC_Pipe	Type=Numerical
Rohrlaenge	Abfrage zur Ermittlung der Länge des Kanalelementes.	HVAC_Pipe	Type=Numerical
Aktivitaetsgrad	Abfrage des vorliegenden Aktivitätsgrades der anwesenden Personen nach VDI 2078.	Room	Type=Text
Raumannschluss	Abfrage, ob ein zusätzlicher Bereich indirekt über den aktuellen Raum lufttechnisch versorgt wird.	Room	Type=Text
Raum_ID	Abfrage zur Ermittlung der ElementID von indirekt zu versorgenden Räumen.	Room	Type=Element
V_Anschlussraum	Abfrage des zusätzlichen Luftvolumens von indirekt zu versorgenden Bereichen.	Room	Type=Numerical
Eingabeart_Anschlussraum	Abfrage, ob des Zuastzvolumen exakt zu ermitteln ist.	Room	Type=Text
Raum_Abhaengung	Abfrage zur Ermittlung der ElementID des umgebenden Raumes.	HVAC_Profile	Type=Element
delta_h	Abfrage der zusätzlichen Abzüge bei der lichten Abhängungshöhe, z.B. durch Brandschutzauflagen.	HVAC_Profile	Type=Numerical
Eigen_pipe_user	Abfrage zur Ermittlung des Druckverlust Z (Einzelwiderstand) des Anlagenbauteils.	HVAC_Pipe	Type=Numerical
Ausnutzungsgrad_Profil_inf	Abfrage zur Ermittlung des unteren Ausnutzungsgrades des Profils.	Group	Type=Numerical
Ausnutzungsgrad_Profil_sup	Abfrage zur Ermittlung des oberen Ausnutzungsgrades des Profils.	Group	Type=Numerical
V_Max		HVAC_Fan	Type=Numerical
Kosten_m3		HVAC_Fan	Type=Numerical

Tabelle C.9: BE-Elemente (*From PDM - Basic*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifizier	Description	From PDM (Basic)	
		Productmodel	Content
Zuordnung_Ausgang	Ermittelt die ElementID des zugeordneten Raumes. □	HVAC_Exhaust	ROOM delivers the assigned Room
Zuordnung_Ausgang	Ermittelt die ElementID des zugeordneten Querschnittprofils.	HVAC_Fan	PROFILE_EX delivers the assigned exhaust-side profile
Zuordnung_Ausgang	Ermittelt die ElementID des zugeordneten Querschnittprofils.	HVAC_Pipes	PROFILE_EX delivers the assigned exhaust-side profile
Zuordnung_Ausgang	Ermittelt die ElementID des zugeordneten Kanalelementes bzw. Anlagenbauteils.	HVAC_Profile	ELEMENT_EX delivers the assigned exhaust-side element
Zuordnung_Ausgang_1	Ermittelt die ElementID des zugeordneten Querschnittprofils.	HVAC_Junction	PROFILE_EX1 delivers the assigned exhaust-side profile1
Zuordnung_Ausgang_2	Ermittelt die ElementID des zugeordneten Querschnittprofils.	HVAC_Junction	PROFILE_EX2 delivers the assigned exhaust-side profile2
dim_Profil_x	Ermittelt die Breite bzw. den Durchmesser des Querschnittprofils.	HVAC_Profile	DIM_X X-dimension (or diameter)
dim_Profil_y	Ermittelt die Höhe des Querschnittprofils.	HVAC_Profile	DIM_Y Y-dimension
Form_Profil	Ermittelt die Form des Querschnittprofils.	HVAC_Profile	SHAPE Shape of the profile
Rohrlaenge		HVAC_Pipe	LENGTH delivers the ...

Tabelle C.10: BE-Elemente (*Value Table*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifizier	Description	Value Table	
		Productmodel	Content
q_p	Tabelle 'Wärmeabgabe des Mensch' nach VDI 2078.	Room	complex content

Tabelle C.11: BE-Elemente (*From PDM - Derived*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifier	Description	From PDM (Derived)	
		Productmodel	Content
A_Raum	Produktmodellzugriff zur Ermittlung der Raumfläche.	Room	AREA Area of the room
V_Raum	Produktmodellzugriff zur Ermittlung des Raumvolumens.	Room	VOLUME Volume of the room
n_Auslaesse	Produktmodellzugriff zur Ermittlung der im Raum vorhandenen Auslässe.	Room	COUNT_EXHAUST Number of assigned exhaust elements to this room
Hoehe_a	Produktmodellzugriff zur Ermittlung des Konstruktionsfreiraums a.	Room	SUS_CEIL_A Construction maximum clearance A of suspended ceiling
Hoehe_b	Produktmodellzugriff zur Ermittlung des Konstruktionsfreiraums b.	Room	SUS_CEIL_B Construction maximum clearance B of suspended ceiling
Hoehe	Produktmodellzugriff zur Ermittlung des Höhe der Abhängung.	Room	SUS_CEIL_H Overall minimum height of suspended ceiling
Abhaengungsstatus	Produktmodellzugriff zur Bestimmung des Anhängungsstatus eines Raumes. Ermittelt, ob eine Abhängung vorhanden ist.	Room	SUS_CEIL_PRESENT Presence of suspended ceiling

Tabelle C.12: BE-Elemente (*Rule-Set*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifier	Description	Rule-Set	
		Productmodel	Content
		Room	(1) if [Geruchsquelle]='ja' AND [Raumart]<>'Raum ohne Mindestwert', then use HVAC_AC_2 (2) else use HVAC_AC_1
		Room	(1) if [V_min_Personen]>=[V_min_Flaeche], then use HVAC_AC_12 (2) else use HVAC_AC_13
		Room	(1) if [Grenzwerteingabe]='ja' AND [Einheitenwahl]='cm3/m3', then use HVAC_AC_29, HVAC_AC_183, HVAC_AC_218, HVAC_AC_219 (2) else if [Grenzwerteingabe]='ja' AND [Einheitenwahl]='mg/m3', then use HVAC_AC_30, H
		Room	(1) if [Schadstoffanfall]='ja', then use HVAC_AC_32 (2) else use HVAC_AC_33
		Room	(1) if [Eingabeart_Luftvolumenstrom]='Absolutwert', then use HVAC_AC_41 (2) else use HVAC_AC_40
		Room	(1) if [Volumenvorgabe]='ja', then use HVAC_AC_196 (2) else use HVAC_AC_44
		HVAC_Profile	(1) if [Form_Profil]='rectangular', then use HVAC_AC_67 (2) else use HVAC_AC_68
		HVAC_Profile	(1) if [Ausnutzungsgrad_Profil_vorh]>[Ausnutzungsgrad_Profil_max] AND [Ausnutzungsgrad_Profil_vorh]<[Ausnutzungsgrad_Profil_min], then use HVAC_AC_75, HVAC_AC_194 (2) else if [Ausnutzungsgrad_Profil_vorh]>[Ausnutzungsgrad_Profil_m
		HVAC_Profile	(1) if [Ausnutzungsgrad_Profil_min]<[Ausnutzungsgrad_Profil_max], then use HVAC_AC_81 (2) else if [Ausnutzungsgrad_Profil_min]>[Ausnutzungsgrad_Profil_max], then use HVAC_AC_82 (3) else use HVAC_AC_83
		Room	(1) if [Eingabeart_delta_t]='nach Tabelle', then use HVAC_AC_92 (2) else use HVAC_AC_88
		Room	(1) if [Kuehlungswahl]='keine Direktkuehlung', then use HVAC_AC_100 (2) else if [Kuehlungswahl]='absolute Leistungseingabe', then use HVAC_AC_98 (3) else use HVAC_AC_169
		HVAC_Junction	(1) if [Zuordnung_Ausgang_1.Druckverlust]>[Zuordnung_Ausgang_2.Druckverlust], then use HVAC_AC_148 (2) else use HVAC_AC_150
		HVAC_Pipe	(1) if [Kanaltyp]='gerades Reduktionsstück', then use HVAC_AC_156 (2) else if [Kanaltyp]='gerade Rohrleitung (ohne Verjüngung)', then use HVAC_AC_155 (3) else use HVAC_AC_225
		Room	(1) if [Raumart]='Einzelbüro' OR [Raumart]='Gaststätte' OR [Raumart]='Großraumbüro' OR [Raumart]='Hörsaal' OR [Raumart]='Klassenraum' OR [Raumart]='Konferenzraum' OR [Raumart]='Konzertsaal' OR [Raumart]='Lesesaal' OR [Raumart]='Raum ohne M
		Room	(1) if [Raumanschluss]='ja' AND [n_Auslaesse]=0, then use HVAC_AC_50 (2) else use HVAC_AC_176
		Room	(1) if [Eingabeart_Anschlussraum]='freie Eingabe', then use HVAC_AC_179 (2) else use HVAC_AC_175
		Room	(1) if [k_mak_mg_tab]=0 AND [k_mak_cm_tab]<>0, then use HVAC_AC_186 (2) else if [k_mak_cm_tab]=0 AND [k_mak_mg_tab]<>0, then use HVAC_AC_185 (3) else use HVAC_AC_212
		HVAC_Profile	(1) if [Form_Profil]='round', then use HVAC_AC_198 (2) else use HVAC_AC_199
		Room	(1) if [Einheitenwahl]='cm3/m3', then use HVAC_AC_213 (2) else use HVAC_AC_214

Tabelle C.13: BE-Elemente (*Rule-Set*) der MORLA-Wissensbank HVAC

Identifizier	Description	Proof Selection	
		Productmodel	Content
	Nachweiseselektion 'Mindestaussenluftstrom' nach DIN 1946 Teil 2 für Testzwecke. Standardmäßig deaktiviert.	Room	Proof condition: [V_min]>=0
	Nachweiseselektion 'Schadstoffanfall' nach DIN 1946 Teil 2 für Testzwecke. Standardmäßig deaktiviert.	Room	Proof condition: [V_mak]>=0
	Nachweiseselektion 'Volumenvorgabe' für Testzwecke. Standardmäßig deaktiviert.	Room	Proof condition: [V_Vorgabe]>=0
	Nachweiseselektion 'Raumluftvolumen' für Testzwecke. Standardmäßig deaktiviert.	Room	Proof condition: [V_ert_Auslass]>=0
	Nachweiseselektion 'Querschnitt' für Testzwecke. Standardmäßig deaktiviert.	HVAC_Profile	Proof condition: [A_ert]>0
	Nachweiseselektion für den Nachweis der Kanalquerschnitte.	HVAC_Profile	Proof condition: [txt_Nachweis]='Nachweis erbracht' AND [txt_Eingabe]<>"
	Nachweiseselektion für den Nachweis der Leistung des Ventilators.	HVAC_Fan	Proof condition: [Druckverlust]>=[Null] AND [Luftvolumen]<=[V_Max]
	Nachweiseselektion 'Kühllast' für Testzwecke. Standardmäßig deaktiviert.	Room	Proof condition: [V_Kuehllast]>=0
	Nachweiseselektion für den Nachweis des Konstruktionsdetails Abhängung.	HVAC_Profile	Requirement rule: [Nachweis_Kanal]=1 AND [Abhaengung_vorhanden]=1 Proof condition: [h_ert]<=[h_vorh]
		HVAC_Pipe	Proof condition: [txt_Nachweis]='Nachweis erbracht' AND [txt_Eingabe]<>"
		HVAC_Junction	Proof condition: [txt_Nachweis1]='Nachweis erbracht' AND [txt_Eingabe1]<>"
		HVAC_Edge	Proof condition: [txt_Nachweis]='Nachweis erbracht' AND [txt_Eingabe]<>"
		HVAC_Exhaust	Proof condition: [Luftvolumen]>=[Null]
		HVAC_Junction	Proof condition: [txt_Nachweis2]='Nachweis erbracht' AND [txt_Eingabe2]<>"

LITERATURVERZEICHNIS

- [ALB02] ALBERT, A.: *Wissensbasiertes Entwerfen und Bemessen von Tragwerken unter Einsatz von Fuzzy-Methoden*; Dissertation, TU Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002
- [ALB92] ALTENKRÜGER, D.; BÜTTNER, W.: *Wissensbasierte Systeme*; Vieweg, Braunschweig, 1992
- [ALD05] ALDA, S.: *Peer Group-Based Dependency Management in Service-Oriented Peer-to-Peer Architectures*; Proceedings of the Third International Workshop On Databases, Information Systems and Peer-to-Peer Computing (DBISP2P), Trondheim, 2005
- [ALT93] VON ALTROCK, C.: *Fuzzy Logic - Technologie*; Oldenbourg-Verlag, München, 1993
- [AMB00] AMBLER, S. W.: *Agile Database Techniques - Mapping Objects To Relational Databases*; Wiley-Publishing, 2003
- [AYG97] AYOUN, A.; GRABISCH, M.: *Tracks real-time Classification based on Fuzzy Rules*; International Journal of Intelligent Systems (12), S. 865-876, 1997
- [BEH02] BEHANECK, M.: *IBPM darf jetzt kein Fremdwort mehr bleiben*; Deutsches IngenieurBlatt – Heft 5, 2002
- [BES91] BECHTOLSHEIM, M. VON; SCHWEICHART, W.: *Expertensystem-Werkzeuge: Produkte, Aufbau, Auswahl*; Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1991
- [BKI03] BEIERLE, C.; KERN-ISEBERGER, G.: *Methoden wissensbasierter Systeme*; Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2003
- [BMT02] BALDONI, R.; MARCHETTI, C.; TERMINI, A.: *Active Software Replication through a Three-tier Approach*; Proceedings of the Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC'02), Tsukuba, Japan, 2002

- [BOS95] BORGHOFF, U. M.; SCHLICHTER, J. H.: *Rechnergestützte Gruppenarbeit – Eine Einführung in verteilte Anwendungen*; Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg / New York, 1995
- [BRE98] BRETSCHNEIDER, D.: *Modellierung rechnergestützter, kooperativer Arbeit in der Tragwerksplanung*; Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Fortschritt-Berichte VDI, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- [BRH95] BRETSCHNEIDER, D.; HARTMANN, D.: *Representing Concurrency in the Design Process by Means of Object Diagrams*; Pahl, Werner (Eds.): Proceedings of the 6th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, S. 81-88, Rotterdam, 1995
- [BRL04] BRACHMAN, R.J.; LEVESQUE, H. J.: *Knowledge Representation and Reasoning*; Morgan Kaufmann, 2004
- [CH+01] CORDÓN, O.; HERRERA, F.; HOFFMANN, F.; MAGDALENA, L.: *Genetic Fuzzy Systems – Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases*; Advances in Fuzzy Systems – Applications and Theory, 2001
- [CIE03] CHIEW SEON TAN, C. S.; SUTTON, R.; CHUDLEY, J.: *Autonomous Underwater Vehicle Retrieval Manoeuvre Using Artificial Intelligent Strategy*; 2003
- [DBA96] DE BAETS, B.: *A Note on Mamdani Controllers*; Ruan, D'Hondt, Govaerts, Kerre (Eds.): Intelligent Systems and Soft Computing, World Scientific Publishing, Singapur, 1996
- [DFG--] DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT: *Schwerpunktprogramm - 1103 / Vernetzt kooperative Planungsprozesse im konstruktiven Ingenieurbau*; <http://www.iib.bauing.tu-darmstadt.de/dfg-spp1103/de/index.html>
- [DHP00] DUBOIS, D.; HAJEK, P.; PRADE, H.: *Knowledge driven versus data driven logics*; Journal of Logic, Language and Information (9), S. 65-89, 2000
- [DIN01] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Bemessung und Konstruktion*; Ausgabe Juli, 2001
- [DOE00] DÖBBELIN, J. U.: *Zur geotechnischen Anwendung wissensbasierter Systeme mit Elementen der Fuzzy-Logik*; Dissertation, Universität Hannover, 2000
- [DPU03] DUBOIS, D.; PRADE, H.; UGHETTO, L.: *A New Perspective on Reasoning with Fuzzy Rules*; International Journal of Intelligent Systems (18), S. 541-567, 2003

- [DPU97] DUBOIS, D., PRADE, H.; UGHETTO, L.: *Checking the Coherence and Redundancy of Fuzzy Knowledge Bases*; IEEE-Transactions on Fuzzy Systems (5), S. 398-417, 1997
- [DRE96] DRECHSEL, D.: *Regelbasierte Interpolation und Fuzzy Control*; Computing & Engineering, Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1996
- [DUP00] DUBOIS, D.; UGHETTO, L.; PRADE, H.: *Fuzzy Interpolation by Convex Completion of Sparse Rule Bases*; Proceedings of the 9th International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEE'00), San Antonio, 2000
- [DUP85] DUBOIS, D.; PRADE, H.: *A Note On Measures Of Specificity For Fuzzy Sets*; International Journal Of General Systems, 10(4), S 279-283, 1985
- [DUP92] DUBOIS, D.; PRADE, H.: *Fuzzy Rules in Knowledge Based Systems – Modeling Gradeness, Uncertainty and Preference*; Yager, Zadeh (Eds.): *An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992
- [DUP94] DUBOIS, D.; PRADE, H.: *On the Validation of Fuzzy Knowledge Bases*; Tzafestas, Venetsanopoulos (Eds.): *Fuzzy Reasoning in Information, Decision and Control Systems*, S. 31-49, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994
- [DUP96] DUBOIS, D.; PRADE, H.: *What are Fuzzy Rules and How to Use Them*; Fuzzy Sets and Systems (84), S. 169-185, 1996
- [DVO97] DUBOIS, D.; PRADE, H.: *On Linguistic Approximation in the Frame of LFLC*; Proceedings of the VIIth IFSA World Congress, S. 413-417, Prague, 1997
- [ESM81] ESRAGH, F.; MAMDANI, E.H.: *A General Approach to Linguistic Approximation*; Mamdani, Gaines (Eds.): *Fuzzy Reasoning and Its Applications*, London: Academic Press, 1981
- [FA+04] FREISCHLAD, M.; ALBERT, A.; PULLMANN, T.; LUBASCH, P.; SCHNELLENBACH-HELD, M.: *Genetic Programming based Fuzzy System Design for Knowledge Representation in Structural Engineering*; Proceedings of the 11th Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE), Weimar, 2004
- [FN+04] FAHRIG, T.; NACHTWEY, B.; GELLER, S.; TÖLKE, J.; KRAFCZYK, M.: *A Product Model based Approach to Interactive CAE Design Optimization*; Proceedings of the Xth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Weimar, 2004

- [FRE05] FREUNDT, M.: *Ein flexibles Modell für die Bauablaufplanung auf Basis von Graphentheorie und Fuzzy Zahlen*; Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Shaker-Verlag, 2005
- [FRI01] FRIEDMANN-HILL, E. J.: *Jess – Expert System Shell for the Java Plattform*; Manual, Version 6.0, 2001
- [FRS90] FRIEDRICH, G.; STUMPTNER, M.: *Einführung in Expertensysteme*; Gottlob, Frühwirth, Horn (Eds.): Expertensysteme, Springer Angewandte Informatik, S. 1-19, Springer-Verlag, 1990
- [FRU04] FRUCHTER, R.: *Degrees of Engagement in Interactive Workspaces*; International Journal of AI & Society, 2004
- [FSH02a] SCHNELLENBACH-HELD, M., FREISCHLAD, M.: *Fuzzy Rule Based Models for Slab System Design*; Schnellenbach-Held, Denk (Eds.): Advances in Intelligent Computing in Engineering, Proceedings of 9th International EG-ICE Workshop, VDI-Fortschritt-Berichte, Darmstadt, 2002
- [FSH02b] FREISCHLAD, M., SCHNELLENBACH-HELD, M.: *A new Approach to Linguistic Approximation of Fuzzy Sets Based on Genetic Algorithms*; Darmstadt Concrete, V17, Eigenverlag, 2002
- [FUL99] FULLER, R.: *On Fuzzy Reasoning Schemes*; Carlson (Edt.): The State of the Art of Information Systems in 2007, TUCS General Publications (16), S. 85-112, 1999
- [GAH92] GARRETT, J. H.; HAKIM, M. M.: *An Object-Oriented Model of Engineering Design Standards*; Journal of computing in civil engineering, 6(3), S. 323-347, 1992
- [GRS03] GÖRZ, G.; ROLLINGER, C.-R.; SCHNEEBERGER, J.: *Handbuch der Künstlichen Intelligenz*; Oldenburg-Verlag, 4. Auflage, 2003
- [HAN00] HAN, C. S.: *Computer Models and Methods for a Disabled Access Analysis Design Environment*; Dissertation, Stanford University, 2000
- [HB+02] HOFFMANN, F.; BAESENS, B.; MARTENS, J.; PUT F.; VANTHIEMEN, J.: *Comparing a Genetic Fuzzy and a Neuro-Fuzzy Classifier for Credit Scoring*; Proceedings of the 5th International FLINS Conference on Computational Intelligent Systems for Applied Research, Gent, 2002
- [HEC98] HECK, P.: *Ein objektorientiertes CAD-Modell für die raum- und bauteilorientierte Bearbeitung von Gebäuden in der Vorplanung*; Dissertation, Univ. Kaiserslautern, 1998
- [HEL01] HELBIG, H.: *Die semantische Struktur natürlicher Sprache - Wissensrepräsentation mit MultiNet*; Springer-Verlag, Heidelberg, 2001

- [HER96] HERRMANN, C.: *Ein hybrides KI-System zur medizinischen Befundung*; Dissertation, TH Darmstadt, DISKI (Dissertationen zur künstlichen Intelligenz) 145, Infix, St. Augustin, 1996
- [HOF01] HOFFMANN, F.: *Evolutionary Algorithms for Fuzzy Control System Design*; Proceedings of the IEEE, 2001
- [HOL96] HOLÉWIK, P.: *Ein objektorientiertes Wissensrepräsentationsmodell zur Entwicklung computerunterstützter Nachweissysteme im Bauwesen*; Dissertation, Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 96-7, Bochum, 1996
- [IFC00] INDUSTRY FOUNDATION CLASSES – RELEASE 2X: *IFC Technical Guide – Enabling Interoperability in the AEC/FM Industry*; 2000
- [ITO93] ITO, K.: *Constraint Management for Concurrent Design and Construction Using an Object-Oriented Project Model*; Cohn (Ed.): Proceedings of the Fifth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, S. 646-653, Anaheim, 1993
- [JAN93] JANG, J.-S. R.: *ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems*; IEEE Transp. Systems, Man & Cybernetics, 1993
- [JEN98] JENDO, S.; NICZYI, J.: *Reliability Estimation of Trusses by Using Fuzzy Sets*; Structural Safety & Reliability, Schuëller, Kafka (Eds.): Proceedings of ICOSSAR 1997, Amsterdam, 1998
- [JOH88] JOHANSEN, R.: *Groupware: Computer Support for Business Teams*; The Free Press – Macmillan, New York, 1988
- [KLK97] KLAWONN, F.; KLEMENT, E.-P.: *Mathematical Analysis of Fuzzy Classifiers*; Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag, Berlin, 1997
- [KLN96] KLAWONN, F.; NOVÁK, V.: *The Relation between Inference and Interpolation in the Framework of Fuzzy Systems*; Fuzzy Sets and Systems (81) S. 31-54, 1996
- [KMV04] KORBION, H.; MANTSCHKEFF, J.; VYGEN, K.: *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure*; Beck Juristischer Verlag, 2004
- [KUN00] KUNCHEVA, L. I.: *Fuzzy Classifier Design*; Studies in Fuzziness and Soft Computing, Physica-Verlag, 2000
- [LUB02] LUBASCH, P.: *Genetische Optimierung in wissensbasierten Entwurfssystemen für den Stahlbetonhochbau*; Diplomarbeit am Institut für Massivbau der TU Darmstadt, 2002

- [LUE04] LÜCKEN, T. : *Zur Schadensanalyse von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken mit Fuzzy-Expertensystemen* ; Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2004-1, Shaker Verlag, 2004
- [LUT30] LUKASIEWICZ, J. ; TARSKI, A.: *Untersuchungen über den Aussagekalkül*; Comptes rendus de séances de la Société de Sciences et des Lettres de Varsovie, S. 50-30, 1930
- [MAA75] MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S.: *An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller*; International Journal of Man-Machine Studies (7), S. 1-13, 1975
- [MES93] MESSNER, J. I.; SANVIDO, V. E.: *Developing an Integrated Database Structure for the Lifecycle of Precast Concrete Projects*; Cohn (Ed.): Proceedings of the Fifth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, S. 646-653, Anaheim, 1993
- [MIL05] MILES, J.: *IT-Supported Collaboration for Structural Engineering*; Structural Engineering International (3), S. 139-144, 2005
- [MMC02] MILES, J.; MOORE, L.; CADOGAN, J.: *Matching Computational Strategies to Task Complexity and User Requirements*; Advanced Engineering Informatics (16), S. 41-51, 2002
- [MOH91] MORSE, D. V.; HENDRICKSON, C.: *Model for Communication in Automated Interactive Engineering Design*; Journal of Computing in Civil Engineering (1), S. 4-25, 1991
- [MVS03] MICROSOFT: Handbuch für Visual Studio.NET, Professional Edition, 2003
- [NAK99] NAUCK, D.; KRUSE, R.: *Neuro-Fuzzy Systems for Function Approximation*; Fuzzy Sets and Systems (101), S. 261-271, 1999
- [NII86] NII, H. P.: *Blackboard Systems: Blackboard Application Systems – Blackboard Systems from a Knowledge Engineering Perspective*; AI Magazine (3), S. 82-106, 1986
- [NKK96] NAUCK, D.; KLAWONN, F.; KRUSE, R.: *Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme*; Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 1996
- [OBE91] OBERQUELLE, H.: *Kooperative Arbeit und menschengerechte Groupware als Herausforderung für die Software-Ergonomie*; Oberquelle (Ed.): Kooperative Arbeit und Computerunterstützung, S. 1-10, Verlag für Angewandte Psychologie, Stuttgart, 1991
- [ORC01] ORCHARD, R. A.: *FuzzyJ: Toolkit for the Java Platform*; User's Guide, Version 1.2, 2001
- [OUS04] OUSSALAH, M.: *Some Notes on Fusion of Uncertain Information*; International Journal of Intelligent Systems (19), S. 499-524, 2004

- [OUT97] OUTRAM, N.J.: *Intelligent Pattern Analysis of the Foetal Electrocardiogram*; Ph.D. Thesis, School of Electronic, Communication and Electrical Engineering, University of Plymouth, 1997
- [PCG04] PALLEMULLE, S. L.; CLARK, V. H.; GOLDMAN, K. J.: *Supporting Live Development of SOAP and CORBA Clients*; Department of Computer Science and Engineering, Technical Report (56), 2004
- [PET02] PETERSEN, M.: *Ein Konzept verteilter Software-Komponenten zur Integration der thermischen Bauphysik in die Gebäudeplanung*; Dissertation, TU Darmstadt, Shaker Verlag, 2002
- [PUP88] PUPPE, F.: *Einführung in Expertensysteme*; Springer Verlag, Berlin – Heidelberg, 1988
- [PUP90] PUPPE, F.: *Problemlösungsmethoden in Expertensystemen*; Springer Verlag, Berlin – Heidelberg, 1990
- [RBP98] RUSPINI, E.; BONISSONE, P.; PEDRYCZ, W.: *Handbook of Fuzzy Computation*; Institute of Publishers (IOP), Bristol, 1998
- [ROE03] RÖNNEBLAD, A.: *Product Models for Concrete Structures – Standards, applications and implementations*; Luleå University of Technology, Licentiate thesis, 2003
- [SAN04] SANDERS, K.: *Why Building Information Modeling isn't Working ... yet*; FAIA, Architectural Record, 2004
- [SCH00] SCHLICHTER, J.: *Rechnergestützte Gruppenarbeit*; Vorlesungsskript, Technische Universität München, 2000
- [SCH91] SCHNELLENBACH, M.: *Wissensbasierte Integration und Steuerung computergestützter Entwurfsprozesse im Stahlbetonbau*; Dissertation, Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 91-15, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bochum, 1991
- [SCH95] SCHWABE, G.: *Objekte der Gruppenarbeit – Ein Konzept für das Computer Aided Team*; Gabler Edition Wissenschaft – Informations-management und Computer Aided Team, Deutscher Universitäts Verlag, 1995
- [SCH99] SCHAUPP, B.: *Grundlagen der Bewertung von Deponien unter Anwendung der Fuzzy-Logik*; Dissertation, Forschungsbericht aus den Gebieten Unterirdisches Bauen, Grundbau und Bodenmechanik an der Bergischen Universität - GH Wuppertal, Heft 19, 1999

- [SEL03] SACKS, R.; EASTMAN, C.M.; LEE, G.: *Process Improvements in Precast Concrete Construction Using Top-Down Parametric 3-D Computer Modeling*; PCI Journal, S. 46-55, 2003
- [SFA02] SCHNELLENBACH-HELD, M., FREISCHLAD, M., ALBERT, A.: *Fuzzy Rule Based Models for Structural Design Decisions*, Proceedings of IABSE-Symposium – Towards a Better Built Environment / Innovation, Sustainability, Information Technology, Melbourne, 2002
- [SG+93] SHARPLES, M.; GOODLET, J. S.; BECK, E. E.; WOOD, C. C.; EASTERBROOK, S. M.; PLOWMAN, L.: *Research Issues in the Study of Computer Supported Collaborative Writing*; Sharples (Ed.): Computer supported collaborative writing, Springer-Verlag, London, 1993
- [SHK02] SHEPHERD, G.; KRUGLINSKI, D. J.: *Inside Visual C++ .NET*; Microsoft Press, 2002
- [SIN63] SIMON, H.; NEWELL, A.: *GPS, a Program That Simulates Human Thought*; Feigenbaum, Feldman (Eds.): Computers and Thought, New York, 1963
- [SOS00] SOSHNIKOV, D.: *Software Toolkit for Building Embedded and Distributed Knowledge-based Systems*; CSIT'2000, Ufa, Russland, 2000
- [SOW92] SOWA, J.: *Principles of Semantic Networks*; Morgan Kaufmann, San Mateo, 1992
- [STE98] STEIGER, F.: *Datenmanagement bei Großprojekten*; Der Eisenbahningenieur, Heft 7, 1998
- [THI01] THIELE, H.: *On the Uniqueness of Interpretations for Fuzzy IF-THEN Rule Bases*; Reusch (Ed.): Proceedings of the 7th International Fuzzy Days on Computational Intelligence - Theory and Applications, Dortmund, 2001
- [TS+95] TEUFEL, S.; SAUTER, C.; MÜHLHERR, T.; BAUKNECHT, K.: *Computerunterstützung für die Gruppenarbeit*; Addison-Wesley Verlag, 1995
- [UDP99] UGHETTO, L.; DUBOIS, D.; PRADE, H.: *Implicative and Conjunctive Fuzzy Rules – A Tool for Reasoning from Knowledge and Examples*; Proceedings of the 16th National Conference on Artificial Intelligence, S. 214-219, Orlando, 1999
- [W3C--] World Wide Web Consortium: *XML Protocol Working Group*; www.w3.org/2000/xp/Group

- [WEB05] WEBER, K.: *Unschärfe stochastische Optimierung und Anwendungen im Marketing*; eingereichte Dissertation, BTU Cottbus, 2005
- [WEI98] WEISBROD, J.: *A new Approach to Fuzzy Reasoning*; Soft Computing (2), S. 89-99, 1998
- [WES98] WEISBROD, J.; SPOTT, M.: *Conditional Constraints, Implication Based Rules, and Possibilistic Rule Bases: Are they any good?*; IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1998
- [YAG80] YAGER, R.R.: *On a General Class of Fuzzy Connectives*; Fuzzy Sets and Systems (4), S. 235-242, 1980
- [YAG83] YAGER, R.R.: *An Introduction to Applications of Possibility Theory*; Human Systems management (3), S. 243-269, 1983
- [YAL93] YABUKI, N.; LAW, K.H.: *An Object-Logic Model for the Representation and Processing of Design Standards*; Engineering with Computers, 9, S. 133-159, Springer-Verlag, London, 1993
- [YEL98] YEN, J.; LANGARI, R.: *Fuzzy Logic: Intelligence, Control and Information*; Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998
- [ZAD65] ZADEH, L. A.: *Fuzzy Sets*; Information and Control, Band 8, S. 338-353, 1965
- [ZAD75] ZADEH, L. A.: *The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning - Part I-III*; : Information Sciences (8+9), 1975
- [ZAD78] ZADEH, L. A.: *Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility*; Fuzzy Sets and Sytems (3), S. 3 – 28, 1978
- [ZAD83] ZADEH, L. A.: *The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert Systems*; Fuzzy Sets and Sytems, 1983
- [ZAD87] ZADEH, L. A.: *Fuzzy Sets and Applications*; Yager, Ovchinnikov, Tong, Nguyen, (Eds.): Fuzzy Sets and Applications - Selected Papers by Zadeh, New York, John Wiley & Sons, 1987
- [ZAD92] ZADEH, L. A.: *The Calculus of Fuzzy If-Then Rules*; AI Expert, 7 (3), S. 23-27, 1992
- [ZAD95] ZADEH, L. A.: *From Computing with Numbers to Computing with Words – From Manipulation of Measurements to Manipulation of Perceptions*; IEEE Transactions on Circuits and Systems, Band 45, S. 105-119, 1995
- [ZAD96] ZADEH, L. A.: *Fuzzy Logic = Computing with Words*; IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Band 4, S. 103-111, 1996

- [ZHC02] ZHAO, Z.; CHEN, C.: *A Fuzzy System for Concrete Bridge Damage Diagnosis*; Computers and Structures (80), S. 629-641, 2002
- [ZIM99a] ZIMMERMANN, F.: *Kooperatives Bauen via www*; Gebäudemanagement, Heft 3, 1999
- [ZIM99b] ZIMMERMANN, H.-J.: *Fuzzy Set Theory*; WiSt 1/1999, Verlage C.H. Beck und Vahlen, München, Frankfurt a. M., S. 22-29, 1999